le Scienze

Giugno 2019
euro 4,90

edizione italiana di Scientific American

Caccia alla gravità quantistica

Esperimenti di laboratorio potrebbero finalmente trovare un legame tra relatività generale e meccanica quantistica

POSTE ITALIANE SPED. IN A.P. - D.L. 353/2003
CONV. L. 46/2004, ART. 1, C. 1, DCB - ROMA
RIVISTA MENSILE - NUMERO 610 - 01 GIUGNO 2019

Clima
Perché aumentano gli eventi meteo più estremi

Neuroscienze
La macchina che traduce i pensieri in movimenti

Etologia
Gli altri animali che usano strumenti

in copertina

Meccanica quantistica e relatività generale potrebbero trovare un punto di incontro grazie a test da effettuare sui banconi dei laboratori (*David Parker/SPL/AGF*)

Sommario

giugno 2019 numero 610

Josh Edelson/Getty Images

12

15

17

SCIENZA NEWS

Phuchit/iStock (*laser*); Detlev Van Ravenswaay/SPL/AGF (*dinosauro*); Kim Westerskov/Getty Images (*universo*)

di Marco Cattaneo

Editoriale

La trappola della cospirazione

Gli studi sulla genesi di teorie complottiste sono ormai numerosi e indicano soluzioni a volte inaspettate

Mancavano pochi giorni a Natale, lo scorso anno, quando Stephen Curry – stella dell'NBA, il campionato di basket professionistico statunitense – esprimeva i suoi dubbi sull'allunaggio in un podcast trasmesso sul sito www.theringer.com. Curry era solo l'ultimo in ordine di tempo di una lunga serie di scettici, ma la sua fama – e il suo seguito mediatico – hanno costretto la NASA a una replica. L'ennesima, visto che già da anni l'agenzia spaziale pubblica le prove degli allunaggi, smontando le obiezioni con pazienza certosina.

E con scarso successo, per lo più. Perché spesso portare prove razionali a chi ha abbracciato una causa su basi irrazionali serve a poco. Basti pensare all'ormai ventennale falso della relazione tra vaccini e autismo. È stato dimostrato da anni che non c'è alcuna relazione tra il vaccino trivalente e l'autismo, con numerose pubblicazioni scientifiche indipendenti e studi epidemiologici di vastissima portata. E in più si è scoperto che Andrew Wakefield aveva alterato i dati della sua pubblicazione su «The Lancet», operando una frode scientifica per sostenere la causa di un vaccino monovalente. Eppure quell'articolo, ritirato dalla rivista dal 2010, continua a essere strumentalizzato dagli antivaccinisti.

Lo stesso vale per gli scettici del riscaldamento globale, che a fronte di migliaia di studi a sostegno della tesi del riscaldamento antropico controbattono con tesi infondate o, nel migliore dei casi, già smentite con solide prove. Poi ci sarebbero persino i terrapiattisti, che si sono riuniti a convegno a metà maggio a Palermo per dare sostanza alla strampalata idea della Terra piatta, in un clima alimentato da teorie del complotto e sfiducia in qualsiasi forma di istituzione, di cui la scienza evidentemente fa parte a pieno titolo.

Ma perché le persone tendono a farsi convincere dalle idee cospirazioniste, dubitando di tutto ciò che è «ufficiale»? E, soprattutto, che si può fare per riportarle al buon senso? Intanto, come racconta Melinda Wenner Moyer a p. 58, bisogna capirne le cause. E gli studi in materia, ormai numerosi, suggeriscono che il complottismo è favorito da uno stato d'ansia persistente, accompagnato da senso di insicurezza, magari in periodi di crisi sociale ed economica come quello che stiamo attraversando.

Quanto al «che fare», molti studi hanno sottolineato l'effetto boomerang del *debunking*: smascherare i complottisti con la logica e le prove sarebbe controproducente, perché non fa che radicalizzarne le posizioni. Ricerche più recenti hanno però rimesso in discussione questi risultati. Un articolo pubblicato nel 2018 su «Political Behavior», ricorda Wenner Moyer, ha concluso che le prove dell'effetto boomerang sarebbero più deboli di quanto si credesse. «Le teorie del complotto sono una reazione umana a un'epoca confusa...», conclude Wenner Moyer. «Ma da questo tipo di pensiero possono derivare danni reali».

In questa delicata situazione è cruciale anche la qualità dell'informazione, che nell'era di Internet sembra aver perso quel ruolo di punto di riferimento che a lungo aveva svolto. Per parte nostra, continueremo ad affidarci alle prove prodotte dalla ricerca scientifica. E continueremo a raccontarvene l'avventura come abbiamo fatto in questi 50 anni e più. Anzi, meglio. Perché da giugno il nostro sito avrà molte importanti novità. Ve ne parliamo a pagina 9.

Allegato a richiesta con il numero di luglio, *La rinascita del tempo*, un libro di Lee Smolin sulla natura dello scorrere degli eventi

Il tempo da riconquistare

A volte un attimo può durare un'eternità, ma è vero anche il contrario. Ogni persona ha una propria idea dello scorrere del tempo, che dipende dai contesti, dalle esperienze, dallo stato d'animo. Ma se c'è una caratteristica del tempo che mette tutti d'accordo è la sua esistenza. C'è solo un problema: per molti fisici il tempo non esiste, ma sarebbe una proprietà emergente, ovvero emergerebbe da elementi di base della realtà, qualunque essi siano.

Certo, oggi i ricercatori sono in grado di costruire orologi così precisi che per rimettere a posto le loro lancette atomiche bisognerebbe attendere un tempo equivalente all'età del cosmo, ovvero 13,8 miliardi di anni. Eppure, se si considerano le due principali teorie con cui descrivere l'universo in termini scientifici, allora il tempo non ha più importanza.

Nella teoria generale delle relatività di Albert Einstein il tempo sfuma. Non c'è un singolo momento speciale e tutti i momenti sono ugualmente reali. Non è possibile stabilire un unico parametro temporale – in altre parole un orologio – per descrivere i fenomeni dell'universo alle grandi scale: sistemi planetari, galassie, ammassi di galassie e via dicendo.

Lo stesso problema del tempo compare nella meccanica quantistica, che descrive la realtà alla scala atomica e subatomica, in particolare nel cosiddetto modello standard. Questo insieme di equazioni che descrive le particelle elementari da cui è composta la materia e le forze fondamentali che agiscono tra di esse, è quasi del tutto reversibile rispetto al tempo. Per inciso, tornando per un attimo alla scala macroscopica del mondo, anche le leggi sulla dinamica dei corpi elaborate da Isaac Newton nel XVII secolo sono indifferenti alla direzione presa dal tempo.

Ma allora, se è possibile invertire senza alcuna conseguenza il flusso degli eventi, qual è il senso di parole come «passato», «presente» e «futuro»? Quella della teoria generale della relatività e della meccanica quantistica sembrerebbe una sentenza senza appello. Del resto, anche per filosofi del calibro di Platone ciò che è reale è atemporale.

Eppure non tutti gli scienziati si arrendono. Come Lee Smolin, autore di *La rinascita del tempo*, il libro allegato a richiesta con «Le Scienze» di luglio. Fisico teorico statunitense, membro tra l'altro del Perimeter Institute for Theoretical Physics in Canada, Smolin si occupa anche della natura del tempo, e in questo libro propone di rimetterlo al centro della descrizione scientifica della realtà. Secondo l'autore sarà un passaggio necessario per colmare le lacune di relatività generale e meccanica quantistica nel tratteggiare lo scenario cosmico. Ancora nessuno sa come andrà finire. Ironicamente, sarà necessario del tempo prima che la disputa sulla sua realtà giunga a una conclusione definitiva.

RISERVATO AGLI ABBONATI

Grande novità per tutti gli abbonati: è on line il nuovo sito **www.ilmioabbonamento.gedi.it** dove è possibile acquistare i prodotti in uscita con Le Scienze allo stesso prezzo dell'edicola.
Registrandosi inoltre è possibile usufruire di sconti sugli abbonamenti del Gruppo Gedi e grandi opportunità anche per l'acquisto di collane.
Continua ogni mese l'uscita dei volumi della collana Frontiere e Coding.

CODING: PIANO DELL'OPERA

Tutti sanno usare uno smartphone, un tablet o un computer. Ma per sfruttare al massimo le potenzialità di questi dispositivi è necessario conoscere il *coding*, una lingua composta da simboli che permette di programmarli. Al coding è dedicata un'iniziativa editoriale, una collaborazione tra l'inserto RLab di «la Repubblica» e «Le Scienze». Da febbraio a giugno, ogni mese in edicola a 9,90 euro in più oltre al prezzo della rivista o del quotidiano, sarà possibile acquistare volumi illustrati che introdurranno i lettori più piccoli e le loro famiglie ai concetti base del mondo della programmazione.

FEBBRAIO
Progetta i tuoi videogames

MARZO
Costruisci la tua sala giochi

APRILE
Anima le tue storie

MAGGIO
Progetta i tuoi giochi a quiz

GIUGNO
Gioca con animazioni, musica e colori

Dai primi di giugno sarà on line il nuovo sito web di «Le Scienze», rinnovato nella grafica e con nuove proposte riguardo ai contenuti

Le novità digitali di «Le Scienze»

Dai primi di giugno il sito di «Le Scienze» cambia faccia, e in parte anche natura. Completamente rinnovato nella grafica, sarà consultabile, oltre che da computer e tablet come è stato finora, anche da smartphone, grazie a un design *responsive*. Un sito più accessibile, quindi, e più facile da usare, che si adegua ai dispositivi degli utenti senza penalizzarne nessuno. E un sito più semplice da navigare, con un'organizzazione che facilita il collegamento tra i contenuti più recenti e quelli del nostro ricchissimo archivio, dove è conservata la memoria di oltre cinquant'anni di progresso scientifico.

A cambiare sono anche i contenuti. Oltre alla versione esclusiva degli articoli dei nostri partner internazionali – a cominciare da «Scientific American» e «Nature» – chi sottoscriverà le offerte di abbonamento troverà, a seconda della scelta, lo sfoglio digitale di «Le Scienze» e «Mind», l'accesso ai file PDF degli articoli principali delle due riviste, e articoli originali che approfondiscono i temi scientifici all'ordine del giorno, esplorando gli aspetti più trascurati da un'informazione generalista spesso frettolosa. Il sito si allinea così alla tradizione della rivista in un approccio al racconto della scienza che privilegia la riflessione e non ha paura di affrontare la complessità del mondo che ci circonda.

Nelle prossime settimane, infine, arriverà un nuovo prodotto editoriale: i «Quaderni de Le Scienze». Una collana digitale di numeri monografici – scaricabili e stampabili – che raccolgono alcuni dei nostri migliori articoli intorno a un tema dell'attualità scientifica.

iStock; elaborazione Le Scienze (3)

Secondo un rapporto delle National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, l'era dell'informatica quantistica è ancora molto lontana

Il futuro incerto del computer quantistico

I computer quantistici sono considerati ormai da anni una sorta di Santo Graal in grado di rivoluzionare l'informatica del futuro. Basati sulle leggi della meccanica quantistica, sarebbero in grado di processare una grande quantità di dati in uno stesso momento, offrendo enormi vantaggi nella capacità di calcolo rispetto ai computer classici.

Tra il dire e il fare, tuttavia, sembra esserci sempre il mare: realizzare un computer quantistico resta ancora oggi una sfida tecnologica estremamente complessa, come sa bene Mark Horowitz, professore alla Stanford University e a capo di un comitato di esperti che qualche mese fa ha elaborato un rapporto sullo stato dell'arte dell'informatica quantistica, pubblicato dalle National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine degli Stati Uniti.

Cortesia Oak Ridge National Laboratory

Quali sono le conclusioni più importanti, in particolare riguardo alle prospettive future del computer quantistico?

Il rapporto ha confermato che l'informatica quantistica rappresenta un'area importante per produrre ricerca continua, perché ha il potenziale di cambiare l'efficienza delle attuali capacità di calcolo. Al tempo stesso, tuttavia, lo sviluppo degli algoritmi necessari a realizzare computer quantistici *error corrected*, cioè privi di errori, richiederà quasi certamente più di dieci anni, e per costruirli, ammesso che si riesca a farlo, servirà in generale uno sforzo notevole. Per questo motivo, sarà molto importante valutare le applicazioni dei cosiddetti computer Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ): si tratta di una categoria intermedia di computer quantistici «imperfetti», ma realizzabili a più breve termine, le cui applicazioni dovranno dimostrare i reali vantaggi di queste macchine.

Le sfide tecnologiche da superare sembrano molte e complesse. Può farci qualche esempio?

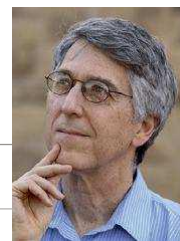
Il «mattone» di base di un computer quantistico è il *qubit*, l'unità di informazione quantistica: dal punto di vista *hardware*, la principale sfida tecnologica è produrre un gran numero di qubit con un tasso di errore molto basso. Per fare ciò, ed è qui la difficoltà principale, i qubit devono essere isolati dall'ambiente: è necessario quindi fare il vuoto o lavorare a temperature molto basse, o entrambe le cose.

Allo stesso tempo, per produrre le operazioni quantistiche desiderate è necessario avere un qualche meccanismo che influisca sullo stato dei qubit, che per esempio devono essere in grado di accoppiarsi ad altri qubit. Questa contemporanea necessità di isolamento e accoppiamento è difficile da ottenere, e tende a far crescere il tasso di errori con l'aumentare del numero di qubit presenti nel sistema.

Sul fronte software, invece, quali sono le difficoltà principali?

Le sfide da superare sono essenzialmente due. La prima sfida è creare algoritmi che funzionino in modo efficiente su un computer quantistico. Il problema è che algoritmi quantistici efficienti sono molto diversi rispetto a quelli usati negli attuali computer classici, ed è quindi necessario sviluppare nuove linee di ricerca *ad hoc*.

La seconda sfida per gli sviluppatori, una volta trovato l'algoritmo giusto, sarà creare un programma quantistico funzionante che «giri» sulla macchina. Anche in questo caso la grande differen-

di Matteo Serra

CHI È

MARK HOROWITZ

Laureatosi in ingegneria elettrica nel 1978 al Massachusetts Institute of Technology di Boston, nel 1984 si è dottorato alla Stanford University, dove è professore al Dipartimento di ingegneria. È considerato uno dei massimi esperti nel settore della progettazione di circuiti integrati digitali e nel 1990 ha fondato Rambus, un'azienda ancora attiva che sviluppa licenze per questa tecnologia, mentre nella sua attività di ricerca a Stanford ha progettato quattro nuovi tipi di processori. È stato anche tra i pionieri dei circuiti VLSI, che adottano un gran numero di transistor nello stesso chip, su cui si basano i moderni microprocessori. Dal 2007 è membro della National Academy of Engineering degli Stati Uniti.

Il supercomputer più potente del mondo, chiamato Summit e costruito allo statunitense Oak Ridge National Laboratory, non è ancora quantistico.

Cortesia Horowitz

za con i sistemi informatici classici rende necessario lo sviluppo di un approccio inedito: una sfida non semplice.

Il vostro rapporto sottolinea che, quando diventeranno realtà, i computer quantistici produrranno risultati in grado di «trasformare la nostra conoscenza dell'universo». Ci può indicare qualche esempio pratico? In particolare in quali aree potremmo vedere le applicazioni più rivoluzionarie?

In alcuni settori l'informatica quantistica ha già cambiato il modo in cui comprendiamo il nostro mondo. Un esempio è la teoria della gravità, che si è scoperto essere in connessione con la teoria dell'informazione quantistica, tanto che l'uso di quest'ultima può permettere di risolvere problemi di gravità quantistica. Tuttavia, al momento non siamo ancora in grado di prevedere in quali settori osserveremo i risultati più rivoluzionari. Molto dipenderà da quali saranno le aree di applicazione dei computer NISQ, e gli eventuali successi guideranno le applicazioni future.

Un altro aspetto importante riguarda il problema della sicurezza informatica. Quali sono le indicazioni emerse a riguardo?

I computer quantistici sarebbero in grado di violare facilmente gli attuali sistemi di cifratura, dunque è necessario lo sviluppo e la diffusione di una «crittografia post-quantistica» che assicuri la sicurezza della rete Internet anche dopo l'eventuale avvento dei computer quantistici. Poiché le procedure di aggiornamento dei protocolli di sicurezza informatici richiedono tempi molto lunghi, è essenziale che i protocolli post-quantistici siano diffusi al più presto, anche se i computer quantistici in grado di rompere le attuali cifrature non vedranno la luce prima di qualche decennio.

Il rapporto sottolinea anche la necessità di costruire un «ecosistema aperto che consenta la libera circolazione di idee». Quanto è importante una collaborazione attiva tra i ricercatori del settore, e perché?

In un settore come quello dell'informatica quantistica, che coinvolge più discipline e con molte sfide aperte da superare prima di produrre tecnologie pratiche, una collaborazione attiva è cruciale. L'unione di idee provenienti da gruppi diversi sarà un fattore essenziale per superare i molti ostacoli che ci separano dal risultato finale.

Secondo lei esiste il rischio che il computer quantistico diventi qualcosa di simile alla fusione nucleare, qualcosa cioè di cui si conosce molto bene la scienza, ma estremamente difficile da mettere in pratica a causa di ostacoli tecnologici?

In questo momento non possiamo dire con certezza che un computer quantistico error corrected, in grado di violare la nostra attuale crittografia, possa essere costruito. Esistono però molti obiettivi intermedi da raggiungere, ed è su questi che è necessario concentrarsi ora per monitorare i progressi dell'informatica quantistica. Un aspetto che ritengo cruciale è quello relativo agli investimenti sul settore, la cui portata dipenderà in modo decisivo dall'eventuale sviluppo di applicazioni a uso commerciale per i computer NISQ: se e quando ciò accadrà, i computer quantistici potrebbero più facilmente diventare realtà.

Kirana si occupa di microlavorazioni laser per un'ampia gamma di settori industriali, da quello automobilistico all'aerospaziale al biomedicale

Un raggio di luce per manifattura di precisione

Raggio di luce in lingua sanscrita. Ecco cosa significa Kirana, il nome scelto da Enrico Gallus per la sua azienda. Un nome che affonda le radici nel passato, così come la ricerca che è il cuore del business di Kirana parla del passato del suo fondatore. «Durante i miei studi al Politecnico di Milano, ormai più di vent'anni fa, restai affascinato dalla fisica dei laser. Tanto da chiedere la tesi proprio in quella materia», racconta Gallus. A tenere le lezioni era uno dei pionieri a livello internazionale della ricerca nel campo dei laser e della fotonica, Orazio Svelto, i cui studi hanno ispirato anche il Nobel per la fisica 2018, Gérard Mourou, nello sviluppo del laser a femtosecondi.

Una scuola d'eccellenza, quindi, che Gallus decide di seguire ma a modo suo: sceglie di svolgere la sua ricerca presso un'azienda specializzata nella saldatura e nel taglio laser. «Una lavorazione piuttosto tradizionale che mi diede comunque la possibilità di approfondire il tema, di condurre molta ricerca sia durante il periodo della tesi sia dopo, quando venni assunto per continuare il lavoro che avevo iniziato», ricorda ancora Gallus.

Spaccare il capello

Passano gli anni e l'ingegnere, insieme al collega Armando Favi, anche lui ingegnere, esperto di progettazione e messa a punto di sistemi, e che diventerà co-fondatore della *start-up*, capisce che per far crescere gli affari la ricetta giusta è concentrarsi su un tipo specifico di lavorazione: restringere il campo ma specializzarsi di più e fornire un servizio ad alto valore aggiunto. Nel 2012 tutto è pronto e nasce Kirana, azienda che si occupa di microlavorazioni laser, cioè di tagliare, forare, ablare, incidere su scala micrometrica e con estrema precisione un'ampia varietà di materiali industriali. Prodotti usati in grandi quantità in diversi settori – da quello automobilistico a quello aerospaziale, dal medicale al settore energetico, dalla microelettronica alla meccanica di precisione – la cui richiesta è in costante aumento vista la tendenza alla miniaturizzazione dei dispositivi.

«Abbiamo deciso di concentrarci sulla lavorazione per conto terzi: i clienti vengono da noi perché vogliono migliorare un loro prodotto; insieme sviluppiamo una soluzione, ne studiamo la fattibilità e quindi la industrializziamo», spiega Gallus. È successo così anche per un cliente davvero particolare, il CERN di Ginevra. «Per loro lavoriamo al miglioramento dei circuiti flessibili stampati con cui sono creati sensori per l'acceleratore di particelle», spiega l'ingegnere. «Il nostro lavoro consiste nel produrre microforature e asole su fogli in Kapton, un tecnopolimero a elevate prestazioni, con cui a Ginevra costruiscono circuiti flessibili. Fori e asole servono per permettere il montaggio di componenti elettronici del circuito».

Phuchit/iStock

Lo strumento che esegue questo lavoro permette di creare fori dell'ordine del micrometro: una risoluzione elevatissima e sofisticata, considerando che il diametro di un capello misura 80 micrometri e quello di un globulo rosso mediamente 8 micrometri. «Noi acquistiamo la sorgente laser insieme ad altri componenti, assi di movimentazione, ottiche, telecamere e così via, e poi li assembliamo seguendo un nostro progetto per ottenere il sistema laser in grado di lavorare con questa precisione», dice Gallus. «Il valore aggiunto è il *know-how* che sviluppiamo con queste macchine: il la-

di Letizia Gabaglio

Le macchine assemblate da Kirana permettono di creare fori dell'ordine del micrometro: una risoluzione assai elevata e sofisticata, considerando che il diametro di un capello misura 80 micrometri.

LA SCHEDA - KIRANA

Azienda fondata nel 2012
Persone di riferimento: Enrico Gallus (socio-Executive Director), Armando Favi (socio-Technical Director), Fabio Raimondi (socio-Quality Director)
Sito: http://www.kirana-laser.it **Mail:** kirana@kirana-laser.it
Numero di brevetti: n.d.
Dipendenti-collaboratori-soci: 4 dipendenti, 4 soci (3 persone fisiche, 1 persona giuridica)

ser non è un utensile classico, ci sono molti parametri da valutare e la nostra esperienza è vasta». Il sistema creato da Kirana ha anche il vantaggio di poter essere usato su molti materiali e questo ha permesso all'azienda di espandere il suo business. Per esempio nel campo dei dispositivi medicali.

«Per aziende che lavorano nella produzione di macchine per l'ossigenoterapia realizziamo microfori calibrati su lamelle che sono assemblate nei sistemi di gestione della portata dell'ossigeno: ruotando la lamella si seleziona il foro e quindi la portata di ossigeno che deve uscire e che il paziente riceve», spiega Gallus. In ogni lamella sono eseguiti più fori che devono essere precisi perché la tolleranza è stretta; in altre parole, non si può rischiare di somministrare una quantità di ossigeno non ottimale per ogni paziente. Sempre nel mondo della salute, Kirana si è affermata come una delle quattro imprese al mondo che fornisce alle aziende farmaceutiche un servizio di supporto al controllo per fiale e contenitori pre-riempiti, che le aziende farmaceutiche stesse sono tenute a fare.

«Per la salute delle persone è fondamentale che non siano immessi in commercio farmaci in contenitori danneggiati che possano favorire qualunque contaminazione con l'esterno. Per questo noi creiamo microdifetti che simulano quello che può accedere nella realtà, sviluppiamo cioè difetti controllati che certifichiamo. Le aziende farmaceutiche poi verificano che le loro macchine siano in grado di identificare il difetto e quindi eliminare dalla catena quel contenitore», afferma Gallus.

Femtosecondi anche in Italia

Grazie a questo servizio, Kirana, che ha la sua sede all'interno del Polo Meccatronica a Rovereto, in Trentino, riesce a fare affari in tutto il mondo, dal Sudafrica all'Uruguay, dal Messico a Taiwan. E proprio a Trento è già operativo il primo laser a femtosecondi d'Italia – quello per cui Mourou ha ricevuto il Nobel – con cui il gruppo di Kirana è pronto a dare vita a un nuovo progetto di ricerca. «Grazie al finanziamento della Provincia di Trento e alla collaborazione dell'Università di Trento e del Politecnico di Milano, sperimenteremo le diverse possibilità d'impiego di questa tecnologia che usa impulsi laser della durata di poche decine di femtosecondi, ovvero pochi milionesimi di miliardesimi di secondo», spiega l'ingegnere. Questa caratteristica permette di asportare materiale senza che il calore influisca sul processo, rendendo possibile la cosiddetta ablazione «fredda»; questa ablazione favorisce l'estrema precisione e qualità delle microlavorazioni, permettendo quindi di accrescere la qualità di quelle già abitualmente effettuate da Kirana, ma anche di eseguirne di nuove, impossibili da realizzare con i laser tradizionali. Per fare che cosa? Per esempio saldare tra loro materiali incoerenti come rame e vetro, oppure modificare le proprietà delle superfici, per esempio per impedire che sulle ali di un aereoplano si formi il ghiaccio.

La tecnologia a femtosecondi potrebbe infine essere impiegata per scavare canali sommersi nei Bio-MEMS o «sistemi micro-elettro-meccanici biomedicali», in sostanza dei chip-laboratorio portatili capaci di analizzare su una superficie di pochi centimetri quadrati i fluidi corporali, come sangue e saliva, per effettuare diagnosi precise e veloci senza dover andare in un centro di analisi.

di Piergiorgio Odifreddi

professore ordinario di logica matematica all'Università di Torino
e *visiting professor* alla Cornell University di Ithaca (New York)

Verde è il colore della speranza

Per realizzare i propri sogni, il movimento ispirato da Greta Thunberg dovrà contestare il sistema economico

Il movimento Fridays for Future, ispirato dalla giovane *influencer* svedese Greta Thunberg e pubblicizzato attraverso i *social media*, ha rapidamente aggregato molti studenti di vari paesi, che hanno scioperato dalla scuola per manifestare la loro preoccupazione per il futuro del pianeta.

Il primo a descrivere il meccanismo dei cambiamenti climatici è stato però il matematico e fisico francese Jean-Baptiste Joseph Fourier, che nella sua *Mémoire sur la température du globe terrestre et des espaces planétaires* (1827) scriveva: «Lo sviluppo e il progresso delle società umane, unito all'azione delle forze naturali, possono mutare considerevolmente ed estesamente lo stato della superficie, la distribuzione delle acque e i movimenti dell'atmosfera. Questi effetti possono, nel corso dei secoli, causare variazioni della temperatura media del pianeta».

Fu invece il chimico svedese Svante Arrhenius, premio Nobel nel 1903, a calcolare nel suo studio *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground* (1896) che un dimezzamento della CO_2 avrebbe portato a un'era glaciale, e un suo raddoppio a un aumento della temperatura di 3 o 4 °C. All'epoca le emissioni industriali di non erano preoccupanti, ma lo divennero in seguito: la curva di Keeling, rilevata a partire dal 1958 da Charles Keeling all'osservatorio di Mauna Loa mostra una crescita costante dell'anidride carbonica nella troposfera, quasi raddoppiata dall'inizio dell'era industriale.

Quello che è stato fatto

Lungi dall'essere passate inosservate, queste e altre ricerche hanno avuto una vasta risonanza, dal famoso *Rapporto sui limiti dello sviluppo* (1972) del Club di Roma al premio Nobel per la pace assegnato nel 2007 ad Al Gore e all'IPCC, il *panel* intergovernativo sui cambiamenti climatici delle Nazioni Unite.

E qualcosa si è già fatto, per depurare l'atmosfera. Per esempio, nella seconda metà del Novecento tra i gas più preoccupanti c'erano i clorofluorocarburi e il protossido di azoto, emessi da circuiti dei frigoriferi, bombolette spray e fertilizzanti. Il Nobel per la chimica, assegnato nel 1995 a Paul Crutzen, Frank Sherwood Rowland e Mario Molina, per aver mostrato che questi gas erano responsabili del famigerato buco dell'ozono, stimolò la stesura del Protocollo di Montreal nel 1987, la cui immediata adozione risolse senza troppi sforzi il problema della diminuzione dell'ozono.

Contestare per sperare

Il problema del contenimento delle emissioni di anidride carbonica è risultato molto più refrattario, come hanno dimostrato il fallimento del coercitivo Protocollo di Kyoto del 1997 e la sua sostituzione con il volontaristico Accordo di Parigi nel 2016. Il motivo profondo di questo fallimento è spiegato da una serie di simulazioni matematiche, che provano come il desiderio ambientalista di tornare anche solo al livello di consumo di risorse del 2000 sia incompatibile con la pretesa economica di preservare il livello di crescita attuale.

Un rapporto sull'uso delle risorse globali pubblicato nel 2017 dal Programma per l'Ambiente delle Nazioni Unite mostra che neppure gli strumenti più arditi della *green economy*, e cioè una supertassazione che decuplicasse il prezzo attuale del carbone, e un superprogresso tecnologico che raddoppiasse l'efficienza attuale dello sfruttamento delle risorse, potrebbero impedire a una crescita annua costante del 2 o 3 per cento di raddoppiare o triplicare entro il 2050 il livello di consumo delle risorse del 2000. Detto altrimenti, la piccola Greta e i suoi giovani *followers* potranno realizzare i propri sogni ecologici solo contestando radicalmente l'attuale sistema economico, e riducendo drasticamente i propri consumi rispetto a quello non solo dei propri genitori, ma anche dei propri fratelli maggiori.

di Telmo Pievani

professore ordinario di filosofia delle scienze biologiche
dell'Università degli Studi di Padova

Una giornata particolare

Un sito di fossili ha restituito una fotografia precisa del momento in cui si sono estinti i dinosauri

Il soldato che muore in trincea, un'ora prima dell'armistizio. Il ragazzo che cerca di fuggire verso la libertà e viene fucilato alle spalle, la notte prima della caduta del muro di Berlino. Le vittime dell'ultima bomba sganciata, nella giornata fatale al cui tramonto tutto sarà concluso. Impressionano sempre le storie di quelli che non ce l'hanno fatta per un pelo, assurdamente colpiti da una logica delle cose che da lì a un attimo sarebbe finita. Altrettanto commoventi sono le vicende di quelli che erano presenti nel momento esatto della catastrofe risolutrice, affaccendati come se fosse una giornata normale. Rispetto alle cesure istantanee della storia, sappiamo tutto del prima e tutto del dopo, ma il durante?

Dal Messico agli Stati Uniti

Nella trama della storia naturale che si dipana per milioni di anni, è quasi impossibile vedere all'opera processi che durano migliaia di generazioni, come la nascita di una specie. Figuriamoci cogliere l'istante di un evento puntiforme, annegato nel tempo profondo, come l'impatto di un asteroide sulla Terra. Ma pare che sia successo e lo abbiamo letto sui «Proceedings of the National Academy of Sciences». Nel sito di Tanis, in North Dakota, negli Stati Uniti, i fossili sembrano descrivere una carneficina.

Poche ore prima, 3000 chilometri più a sud, un bolide enorme era caduto sul golfo del Messico, generando il cratere di Chicxulub. Onde sismiche prima e tsunami poi si irradiarono su tutta la superficie del pianeta.

Nella successione stratigrafica della formazione di Hell Creek si vede un'onda marina enorme irrompere nell'entroterra. Fossili marini come ammoniti, mosasauri e squali sono mescolati a pesci d'acqua dolce e piante sradicate. Tutto è stato sommerso rapidamente, con poco tempo per la decomposizione. Il materiale che ha ricoperto piante e animali porta le firme dell'impatto: piccole sfere vetrose, dovute alla rapida fusione e solidificazione delle rocce del fondo del golfo lanciate in atmosfera, piovvero come proiettili e si infilarono nel fango e nella resina fresca. Poi arrivò la polvere impregnata dell'iridio contenuto nell'asteroide. I pesci agonizzarono in terribili spasmi.

Gli animali a Tanis sembrano accatastati uno sopra l'altro nella direzione dell'onda d'urto che colpì il mare interno occidentale del Nord America di allora. Per lo scopritore Robert DePalma, giovane paleontologo che ancora non convince tutti i colleghi, il sito racconta la scena di una giornata straordinaria di 66 milioni di anni fa: l'era Mesozoica finiva e iniziava quella Cenozoica. Anche se finora non sono stati descritti cadaveri di dinosauri travolti dall'impatto, a Tanis vi sarebbero tracce della loro presenza. Erano i dinosauri non aviani che vissero gli ultimi giorni della loro era, dopo 160 milioni di anni di dominio.

Una biosfera dopo l'altra

Questa interpretazione altisonante andrà vagliata da altri scienziati. Pare che nel sito vi sia molto altro, non ancora pubblicato. Il sogno di ogni paleontologo è vedere nel record fossile una fotografia così precisa, anzi una sequenza cinematografica. L'ipotesi dell'impatto fu a lungo avversata proprio perché pareva impossibile che il passaggio dal Cretaceo al Paleogene fosse stato così repentino, il prodotto di una catastrofe per nulla gradualista, per di più causata da un corpo esterno al pianeta.

Il sito racconta anche il lungo silenzio post-apocalittico. Negli strati appena superiori ricompaiono ovunque spore di felci. La vita ricominciò, ma con assai meno biodiversità. Quello fu il momento in cui una biosfera con le sue regole del gioco, finì. Dopo lo sconvolgimento, all'abbassarsi delle polveri, ne comincerà una nuova. Le nicchie ecologiche lasciate libere dai sommersi verranno ereditate dai salvati. Nulla sarà più come prima, una delle poche volte in cui lo si può dire per davvero.

Apocalisse o no?
L'impatto di un asteroide con il nostro pianeta avvenuto 66 milioni di anni fa pose fine al regno dei dinosauri, ma allo stesso tempo permise ad altre forme di vita, come i mammiferi, di prosperare.

Detlev Van Ravenswaay/SPL/AGF

di Giorgio Manzi

ordinario di paleoantropologia alla Sapienza Università di Roma;
socio corrispondente dell'Accademia Nazionale dei Lincei

La nostra rivoluzione

La comparsa di *Homo sapiens* sarebbe il risultato di un drastico mutamento nel regolamento di geni e ormoni

"Detta così ... va già molto meglio; ma bisognerà riparlarne». Con questo punto lasciato in sospeso chiudevo la volta scorsa il nostro appuntamento mensile, nello stesso fascicolo in cui il direttore terminava il suo editoriale dicendo: «... la ricerca delle nostre origini non è mai stata così avvincente». Per cercare allora di tener fede a entrambi gli assunti, torniamo sulla questione delle origini di *Homo sapiens*, avendo a mente i tanti e diversi nuovi dati (*si vedano gli articoli alle pp. 34 e 42 del precedente numero di «Le Scienze»*) che animano il dibattito attuale intorno a un tema – neanche a dirlo – cruciale.

Un passaggio speciale

A mio avviso, però, si trascura una domanda altrettanto cruciale. Cos'è che fa di noi la specie che siamo? Questa domanda mi ricorda un commento di Chris Stringer apparso su un fascicolo speciale di «Nature» del 2012 e che era intitolato *What makes a modern human*. Dopo una rassegna del dibattito storico e dei dati più recenti, specie quelli della paleogenomica, l'autorevole antropologo del Natural History Museum di Londra si soffermava su aspetti di carattere deontologico ed etico: «... se i ricercatori vogliono continuare i progressi fatti recentemente nello studio delle origini della variabilità umana moderna, dovranno riflettere a lungo sui loro obiettivi e sul lessico che usano.» Concludeva poi così: «... la maggior parte dei nostri geni (più del 90 per cento) deriva dalla nostra comune eredità africana, e questo elemento necessariamente prevale sulla minore quantità di DNA che ci rende diversi, comunque e quando sia stata acquisita.»

Questo è il punto e vorrei aggiungere una considerazione. Ciò che a me sembra determinante è che tutte le varietà del genere *Homo*, quelle che (in Africa e altrove) precedono e poi affiancano le prime forme anatomicamente moderne, si caratterizzino per un cranio (e il cervello al suo interno) allungato antero-posteriormente. Fa la differenza la comparsa di *H. sapiens*, con cui assistiamo a un passaggio evolutivo speciale, in cui il cranio si accorcia e si innalza, perdendo gli elementi di arcaicità che per quasi due milioni di anni avevano caratterizzato le specie umane. Lo vediamo per la prima volta in fossili rinvenuti in Etiopia e datati fra 200.000 e 150.0000 anni fa.

Cambiamento ontogenetico

Dietro ogni morfologia c'è un diverso processo ontogenetico; esiste cioè una diversa regolazione dei fattori di accrescimento e sviluppo, prima e dopo la nascita, come pure ci sono differenze che possono riguardare il funzionamento del cervello, le capacità cognitive e di apprendimento. In questa luce, vedo la comparsa di *H. sapiens*, momento cruciale per spiegarci in che modo siamo venuti al mondo, come il risultato di una «rivoluzione ontogenetica». In altre parole, penso che sia intervenuto un drastico mutamento di alcuni fattori del regolamento genetico e ormonale; un cambiamento che sarebbe avvenuto a carico di una piccola popolazione, isolata dalle altre.

Lo dimostra il fatto che tutte le altre linee evolutive del genere *Homo* – quella dei Neanderthal, per fare il caso più vistoso – hanno seguito traiettorie di espansione encefalica che non sono state accompagnate da una riconfigurazione dell'architettura cranica, come invece è capitato a noi. Una rivoluzione ontogenetica, dunque, in cui si ottiene una nuova regolazione dei tempi e delle modalità di accrescimento e sviluppo e, sul piano morfologico, una più efficiente armonia tra espansione encefalica e ossificazione del cranio.

Questo, secondo me, è alla base di ciò che Linneo denominò *Homo sapiens*.

Poi nulla toglie che, in seguito, la nuova specie si possa essere parzialmente e variamente ibridata con popolazioni della specie madre e di altre specie sorelle.

di Amedeo Balbi

professore associato di astronomia e astrofisica
al Dipartimento di fisica dell'Università di Roma Tor Vergata

Il destino delle specie tecnologiche

È davvero inevitabile che le società avanzate finiscano fatalmente per provocare una catastrofe planetaria?

Negli ultimi anni, si sente parlare sempre più spesso di Antropocene, una denominazione proposta nel 2000 dal premio Nobel per la chimica Paul Crutzen per indicare l'epoca geologica che stiamo vivendo. L'idea dietro la definizione di Antropocene è che siamo entrati ormai in una fase in cui l'attività umana ha la capacità di influenzare profondamente lo stato globale del pianeta, con un impatto del tutto comparabile, se non addirittura superiore, a quello dei fenomeni geologici.

È ancora dibattuto se l'Antropocene possa essere considerato una vera e propria nuova era, distinta dall'Olocene (l'epoca di relativa stabilità climatica iniziata circa 12.000 anni fa, alla fine dell'ultima era glaciale, e che ha reso possibile l'emergere delle civiltà umane moderne). Tuttavia, c'è sempre più consenso intorno al fatto che si possa parlare di Antropocene quanto meno in senso lato, e che l'effetto delle società umane non possa essere trascurato quando si prova a prevedere l'evoluzione futura del nostro pianeta.

Risorse energetiche

La cosa, naturalmente, è rilevante per le scelte che ci troviamo a fronteggiare in questi anni, in particolare riguardo al cambiamento climatico. Tuttavia se si allarga l'ottica sul resto dell'universo – pensando alle migliaia di pianeti extrasolari scoperti negli ultimi anni e ai moltissimi altri che verranno scoperti in futuro – ci si può fare una domanda più generale: ovvero, quali sono le richieste che l'evoluzione biologica finisce per porre al proprio ambiente planetario, in termini di risorse energetiche? È possibile che esistano traiettorie sostenibili, oppure tutte le specie che raggiungono un certo livello di sviluppo tecnologico finiscono fatalmente per provocare una catastrofe planetaria, segnando la propria estinzione?

Qualche tempo fa, uno studio pubblicato sulla rivista «Astrobiology» da Adam Frank, della statunitense Università di Rochester, e colleghi ha affrontato la questione attraverso l'impiego di modelli fisico-matematici, prendendo in considerazione da un lato il consumo energetico di una popolazione «tecnologica» (ovvero in grado di alterare le condizioni globali del suo ambiente) e dall'altro i feedback della popolazione stessa sul pianeta che la ospita.

Cattive notizie

Prima le cattive notizie: in tre dei quattro scenari considerati, la crescita della popolazione coincide con un aumento della temperatura globale. In un caso, la popolazione declina rapidamente subito dopo aver scatenato un brusco cambiamento climatico, riuscendo a sopravvivere sebbene decimata. Negli altri due scenari con esito negativo, la popolazione scompare completamente: in un caso, la catastrofe avviene nonostante il passaggio, tardivo, allo sfruttamento di risorse a basso impatto ambientale.

L'unico scenario che lascia qualche speranza è quello in cui tanto la popolazione quanto la temperatura si stabilizzano grazie all'adozione di misure tempestive. Dobbiamo augurarci di essere in questa situazione, e di trovare una via per la sostenibilità nell'immediato futuro.

Decenni fa, con il rischio di un conflitto nucleare tra le due grandi potenze che dominava le preoccupazioni dell'opinione pubblica, l'astrofisico Carl Sagan mise la questione della sopravvivenza della nostra specie in una prospettiva cosmica: se tutte le civiltà si autodistruggono dopo poche migliaia di anni, allora l'universo è desolantemente vuoto.

Ma non è detto che debba essere per forza così. Sta a noi dimostrare che c'è una strada possibile per conciliare il progresso con la longevità, e che l'estinzione non sta scritta nelle leggi di natura.

Kim Westerskov/Getty Images

Un universo vuoto. Se tutte le civiltà si autodistruggono dopo qualche migliaio di anni, allora l'universo è desolantemente vuoto.

SALUTE

Fratelli diversi per lo spazio

Uno studio su gemelli ha analizzato l'effetto sulla salute della vita in orbita

Robert Markowitz/NASA/SPL/AGF

Al servizio dell'umanità. Nell'ambito dello studio della NASA sulla salute umana nello spazio, uno dei gemelli, Mark (*sinistra*), è rimasto sulla Terra, l'altro, Scott (*destra*), a bordo sulla Stazione spaziale internazionale per quasi un anno.

Grazie agli effetti relativistici è diventato sei minuti più giovane del suo gemello, ma un po' più malconcio. È Scott Kelly, l'astronauta rimasto quasi un anno sulla Stazione spaziale internazionale, protagonista dello studio più approfondito mai condotto sugli effetti della permanenza umana nello spazio, approfittando di una risorsa non comune: il gemello Mark, rimasto sulla Terra. I dati genomici e proteomici, molecolari, fisiologici e cognitivo-comportamentali raccolti su Scott prima, durante e dopo la missione sono stati quindi confrontati con quelli del fratello.

Lo spazio mette a dura prova il corpo e la psiche: ci sono l'isolamento, l'ipossia, i ritmi circadiani alterati, ma soprattutto le radiazioni ionizzanti e la microgravità, che turba vari equilibri fisiologici. Gli effetti di questo ambiente ostile restano però poco noti. Con questo studio, pubblicato su «Science», un vasto gruppo della NASA e di vari altri centri statunitensi li ha indagati in dettaglio. Con esiti tutto sommato rassicuranti: la gran parte dei parametri che in orbita si erano alterati è tornata nella norma entro sei mesi dal rientro, e la salute complessiva non ne ha risentito.

Durante la missione gli scienziati hanno registrato molte anomalie a basso rischio, per esempio nella composizione del microbioma intestinale, e a medio rischio, come nella produzione di collagene. Ad alto rischio, e non del tutto rientrata, era invece l'instabilità genomica: alterazioni cromosomiche come le inversioni (un tratto di cromosoma che si rompe ed è reincorporato capovolto) erano attese in base alla dose di radiazioni ricevuta, equivalente a 50 anni di esposizione naturale sulla Terra. Le inversioni sono spesso innocue ma a volte danneggiano punti sensibili del DNA, e in generale l'instabilità genomica può aumentare il rischio di cancro. Inoltre, fra le molte variazioni di espressione genica registrate in orbita, per esempio in geni legati allo stress, la gran parte è tornata alla norma; ma l'espressione di geni per riparare il DNA è rimasta aumentata, a riprova dei danni persistenti. Poco chiaro è il comportamento dei telomeri, le estremità protettive dei cromosomi che si accorciano con l'invecchiamento: in orbita si sono allungati, inaspettatamente, poiché lo stress del volo dovrebbe avere effetti simili alla senescenza; poi sono tornati come prima, ma qualche volta si sono accorciati ancora di più.

Non c'è ancora, insomma, un quadro esaustivo. Gli autori rimarcano che un solo caso non fa testo, e non si sa che effetti avranno le anomalie a lungo termine, né quanto dipendano da fattori contingenti come le differenze di alimentazione e attività fisica. Ma intanto lo studio pone un punto fermo, da cui la NASA partirà per le nuove ricerche già in programma, su gruppi di astronauti più numerosi.

Giovanni Sabato

PLANETOLOGIA

Anche Marte trema

La missione InSight della NASA ha registrato un debole sisma in superficie

Il lander InSight della NASA ha raccolto il segnale del primo terremoto sulla superficie di Marte. Secondo il gruppo guidato da William «Bruce» Banert, *principal investigator* della missione al Jet Propulsion Laboratory (JPL) di Pasadena, in California, la lievissima vibrazione rilevata il 6 aprile scorso dallo strumento SEIS (Seismic Experiment for Interior Structure) è di natura diversa da quelle prodotte dal vento marziano ed è con ogni probabilità di origine sismica. Con questa osservazione si inaugura la sismologia marziana, dalla quale i planetologi si attendono di approfondire la conoscenza della struttura interna del pianeta e di mettere alla prova i diversi modelli teorici.

Arrivata su Marte il 26 novembre 2018, la missione InSight (acronimo di Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) ha lo scopo di studiare l'interno del pianeta con una serie di strumenti appositamente progettati, come il sismometro SEIS, depositato sulla superficie marziana il 19 dicembre grazie al braccio robotizzato della sonda. Dopo i sismometri depositati sulla superficie lunare dagli astronauti delle missioni Apollo, che hanno rivelato migliaia di terremoti nel periodo in cui sono stati operativi (dal 1969 al 1977), questa è la prima volta che un sismometro viene collocato sulla superficie di un altro pianeta.

A differenza della Terra, dove i sismi sono causati dal processo della tettonica a placche, la superficie di Marte è scossa da un possibile residuo di attività vulcanica, ma soprattutto dal lento e inesorabile processo di raffreddamento interno e dalla conseguente contrazione della crosta. Qui talvolta la tensione raggiunge valori tali da produrre spaccature e liberare l'energia accumulata. Il primo «martemoto» è stato molto debole, ma i ricercatori stanno già analizzando i dati. In attesa del prossimo.

Emiliano Ricci

La prima molecola del cosmo

L'universo è nato da poche centinaia di milioni di anni, un'inezia nella sua storia, quando, subito dopo il big bang, prende forma la prima molecola del cosmo. Inseguita per decenni dagli astronomi, finalmente è stata scovata. È lo ione idruro di elio, nato circa 13 miliardi di anni fa dalla combinazione tra ioni idrogeno, cioè i protoni, e atomi di elio. La scoperta, pubblicata su «Nature», è opera di un gruppo di ricercatori del Max Planck Institut für Radioastronomie a Bonn, coordinato da Rolf Güsten.

La prima molecola del cosmo bambino, o meglio, una sua versione più recente, è stata catturata nella nebulosa NGC 7027, visibile nella costellazione del Cigno, a circa 2600 anni luce dalla Terra. «La giovane età di questa nebulosa l'ha resa un buon candidato per la formazione di ioni idruro di elio, poiché al suo interno le condizioni sono simili all'universo bambino», scrivono gli autori della scoperta su «Nature».

L'esistenza degli ioni idruro di elio era stata dimostrata per la prima volta in laboratorio nel 1925, tuttavia non erano mai stati trovati nello spazio prima d'ora.Güsten e colleghi ci sono riusciti grazie all'osservatorio SOFIA (Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy), nato dalla collaborazione tra NASA e Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, l'agenzia spaziale tedesca, che da nove anni scruta il cielo nell'infrarosso a bordo di uno speciale Boeing 747 adattato per ospitare il telescopio.

«La chimica dell'universo come lo conosciamo – spiega Güsten – è iniziata con i primi ioni di idruro di elio». Secondo gli autori, però, finora rilevare la firma di queste molecole è stato difficile a causa della loro stessa natura: non hanno vita lunga, trasformandosi in molecole di idrogeno e atomi di elio. «La formazione dei primi ioni di idruro di elio – precisa Güsten – è stata possibile solo quando la temperatura dell'universo primordiale è scesa al di sotto di 4000 gradi centigradi. Solo allora si sono potuti formare i primi atomi di elio che, combinandosi con i protoni, hanno poi dato origine alle prime molecole dell'universo».

Davide Patitucci

EVOLUZIONE

Una faccia, una storia

Ricostruita la storia evolutiva del nostro volto a partire dalle facce dei primi ominini

Sono passati più di quattro milioni di anni da quando i nostri antenati hanno iniziato a camminare in posizione eretta e da allora il corpo non è cambiato granché, mantenendo un'architettura adatta alla locomozione bipede.

Non si può dire lo stesso per la faccia, che dai primi ominini a *Homo sapiens* si è molto trasformata dietro la spinta di pressioni ecologiche e sociali via via differenti. A ricostruire questa evoluzione, confrontando l'anatomia craniofacciale di ominini vissuti negli ultimi quattro milioni di anni, sono stati Juan-Luis Arsuaga dell'Università Complutense di Madrid e colleghi sulle pagine di «Nature Ecology & Evolution».

In sintesi, oggi abbiamo facce più piccole e schiacciate del passato, con arcate sopraccigliari poco pronunciate. L'ingentilimento del volto umano è in parte dovuto al cambiamento della dieta: gli *Australopithecus* compresi tra circa 4-2 milioni di anni fa consumavano vegetali duri e ciò spiegherebbe i loro zigomi pronunciati e le mandibole robuste per la masticazione (in realtà alcuni *Australopithecus* mangiavano cibi più teneri, prova del fatto che il rapporto tra dieta e forma del viso è più complesso di quanto sembri). Quando, circa 2,5 milioni di anni fa, comparve il genere *Homo* con i suoi strumenti per processare il cibo, questi caratteri si persero a favore di lineamenti più delicati. Anche la socialità ha avuto un peso importante sull'evoluzione del viso. Le prominenti arcate sopraccigliari dei Neanderthal sono state interpretate come funzionali a mostrare aggressività, e se noi le abbiamo perse è stato per guadagnare più espressività e favorire la cooperazione. Ma la storia non è finita, perché è probabile che cambiamenti climatici, migrazioni e diete sempre più «raffinate» (nel senso di industriali) cambieranno i connotati ai nostri discendenti.

Martina Saporiti

Natural History Museum, London/SPL/AGF

Metano marziano sì, metano marziano no...

Per i planetologi, la presenza di metano su Marte è da decenni un vero enigma. Le prime osservazioni effettuate da Terra, fra il 1999 e il 2003, mostravano una certa abbondanza di questa molecola nell'atmosfera marziana, con variazioni stagionali e connessa a determinate regioni del pianeta. La prima osservazione ravvicinata, nel 2004 a opera del satellite Mars Express dell'Agenzia spaziale europea (ESA), confermò la presenza del gas, la cui origine può essere dovuta a processi sia geologici sia biologici.

Nel 2013, il rover marziano della NASA Curiosity, all'interno del cratere Gale, ha rilevato ancora una volta un picco di metano. Adesso arriva la conferma indipendente di quell'osservazione da parte di un gruppo guidato da Marco Giuranna, dell'Istituto nazionale di astrofisica. Il gruppo ha analizzato i dati registrati da Mars Express negli stessi giorni di Curiosity relativi alla regione del cratere Gale, trovando una concentrazione di metano pari a 15 parti per miliardo di volume (ppbv), rilevato il giorno successivo al dato del rover NASA (6 ppbv).

I risultati di Giuranna e colleghi, pubblicati sulla «Nature Geoscience», tuttavia sono relativi a un particolare periodo e a una regione ridotta del pianeta, considerato che osservazioni globali successive non hanno più rilevato concentrazioni di metano superiori a 1 ppbv. Fra queste, le recenti misurazioni effettuate dallo strumento Trace Gas Orbiter (TGO) della missione congiunta ESA-Roscosmos (l'agenzia spaziale russa) ExoMars, ora in orbita attorno al Pianeta rosso, e pubblicate su «Nature» (primo autore Oleg Korablev, dell'Accademia russa delle scienze di Mosca), che non rivelano alcuna traccia di metano. L'interpretazione di questi risultati, apparentemente in contraddizione, è che il metano non deve essere sempre presente nell'atmosfera marziana, ma vi viene immesso periodicamente, probabilmente da processi geologici, per poi essere subito rimosso. Resta da capire quali siano i meccanismi da cui ha origine e quali quelli che lo rimuovono.

Emiliano Ricci

SCIENZE DELLA TERRA

Onda su onda

Venti oceanici sempre più veloci portano onde più alte

Con la Terra che si surriscalda e i ghiacci che si sciolgono pensiamo con preoccupazione all'innalzamento del livello del mare e alle conseguenze per le comunità che vivono sulle coste.

Alluvioni ed erosioni però aumenteranno non solo perché gli oceani si stanno gonfiando ma soprattutto perché le tempeste si faranno più violente. Dal 1985 al 2018, scrivono in uno studio su «Science» l'oceanografo fisico Ian Young e il matematico Agustinus Ribal, entrambi dell'Università di Melbourne in Australia, la velocità con cui soffiano i venti oceanici è aumentata mediamente di 1-2 centimetri al secondo per anno.

Nel Pacifico e nel Nord Atlantico l'incremento non è stato elevato quanto nell'Oceano Antartico, dove i venti più forti hanno guadagnato altri cinque centimetri al secondo per anno, che in un trentennio fanno 1,5 metri al secondo (più 8 per cento). Venti più forti portano onde più alte, anche se il fenomeno è rilevante solo nell'Antartico. Qui le onde sono cresciute in media di 0,3 centimetri all'anno con picchi di 1 centimetro, ovvero circa 30 centimetri in più (più 5 per cento) da quando i ricercatori hanno iniziato ad analizzare i dati. Questi ultimi, quattro miliardi di misurazioni, sono stati raccolti da 31 satelliti equipaggiati con altimetri (radar per misurare altezza delle onde e velocità dei venti), radiometri (velocità dei venti) o scatterometri (velocità e direzione dei venti), e confrontati con quelli di 80 boe oceaniche sparse in tutto il mondo.

In realtà, perché con il caldo aumenti la forza dei venti non è ancora ben chiaro, e alcuni sostengono che quelle osservate siano variazioni naturali per un trentennio. Ma è certo che le onde influenzano, per esempio, il flusso di energia e di anidride carbonica tra atmosfera e oceani, e anche per questo è bene sapere come cambieranno in futuro.

Martina Saporiti

I conflitti armati influiscono sull'uso delle foreste

Recentemente, David Landholm del Potsdam Institute for Climate Impact Research e colleghi hanno pubblicato su «Global Environmental Change» uno studio relativo all'influenza dei conflitti armati sulle foreste, nelle zone tropicali in generale ma con un focus particolare sulla Colombia, in Sud America. Sfruttando dati dell'Agenzia spaziale europea per la copertura del suolo e una georeferenziazione dei dati di conflitti armati, ovvero un loro collegamento con coordinate geografiche, i ricercatori hanno trovato che nella stragrande maggioranza dei casi i conflitti portano a un aumento della deforestazione, anche se in alcuni casi si assiste al fenomeno inverso.
A volte l'abbandono delle campagne per le migrazioni interne verso le città permette alle foreste di «riguadagnare terreno». Più spesso, invece, le fazioni in lotta, soprattutto in Colombia, deforestano ulteriormente, per esempio per permettere la produzione illegale e la vendita di cocaina che finanzia la lotta armata.
In generale, quindi, l'impatto dei conflitti armati sull'estensione delle foreste è negativo: mediamente è quattro volte più probabile che dopo un conflitto armato si vada verso un tasso di deforestazione aumentato piuttosto che uno diminuito. In Colombia, addirittura, la probabilità di deforestazione aumentata è otto volte più grande.

Antonello Pasini

ico_k-pax/iStock

MICROBIOLOGIA

Un mare di nuovi virus

Scoperte quasi 200.000 popolazioni virali negli oceani

Quasi 200.000 specie di virus sono state censite negli oceani di tutto il pianeta, oltre 100 volte più di quelle note finora. Lo rivela su «Cell» una mappatura guidata dal microbiologo Matthew Sullivan, della Ohio State University a Columbus, negli Stati Uniti, con una collaborazione internazionale che include Daniele Iudicone, della Stazione zoologica «Anton Dohrn» di Napoli.

L'analisi sfrutta il lavoro di due rilevazioni (*foto*) che in cinque anni hanno raccolto campioni da 80 siti oceanici posti tra la superficie e i quattro chilometri di profondità. Analizzando i DNA virali, Sullivan ha individuato quasi 200.000 popolazioni virali, raccolte in cinque comunità geografiche distinte: una artica, una antartica, e tre che occupano gli oceani temperati e tropicali di tutto il mondo nella fascia epipelagica (0-150 metri di profondità), mesopelagica (150-1000 metri), e batipelagica (sotto i 2000 metri).

La scoperta di queste comunità distinte è una prima sorpresa. Un'altra è la distribuzione della diversità: mentre la biodiversità di gran parte dei gruppi di organismi cala progressivamente dall'equatore ai poli, quella dei virus marini segue questo gradiente solo nell'emisfero sud. In quello settentrionale, la diversità varia in modo irregolare con la latitudine e tocca un picco nei mari artici. Più prevedibile è l'altra zona con alta diversità, quella delle acque superficiali. La mappa andrà comunque definita meglio, dato che vaste zone dell'Oceano Indiano e del Pacifico restano poco scandagliate.

La mappa dovrebbe aiutare a capire vari meccanismi oceanici, rilevanti anche per il clima, visto l'importante contributo dei virus marini nei cicli del carbonio. Sullivan ipotizza addirittura manipolazioni di questi cicli per frenare il cambiamento climatico, ma l'idea resta molto dibattuta visti gli ovvi rischi.

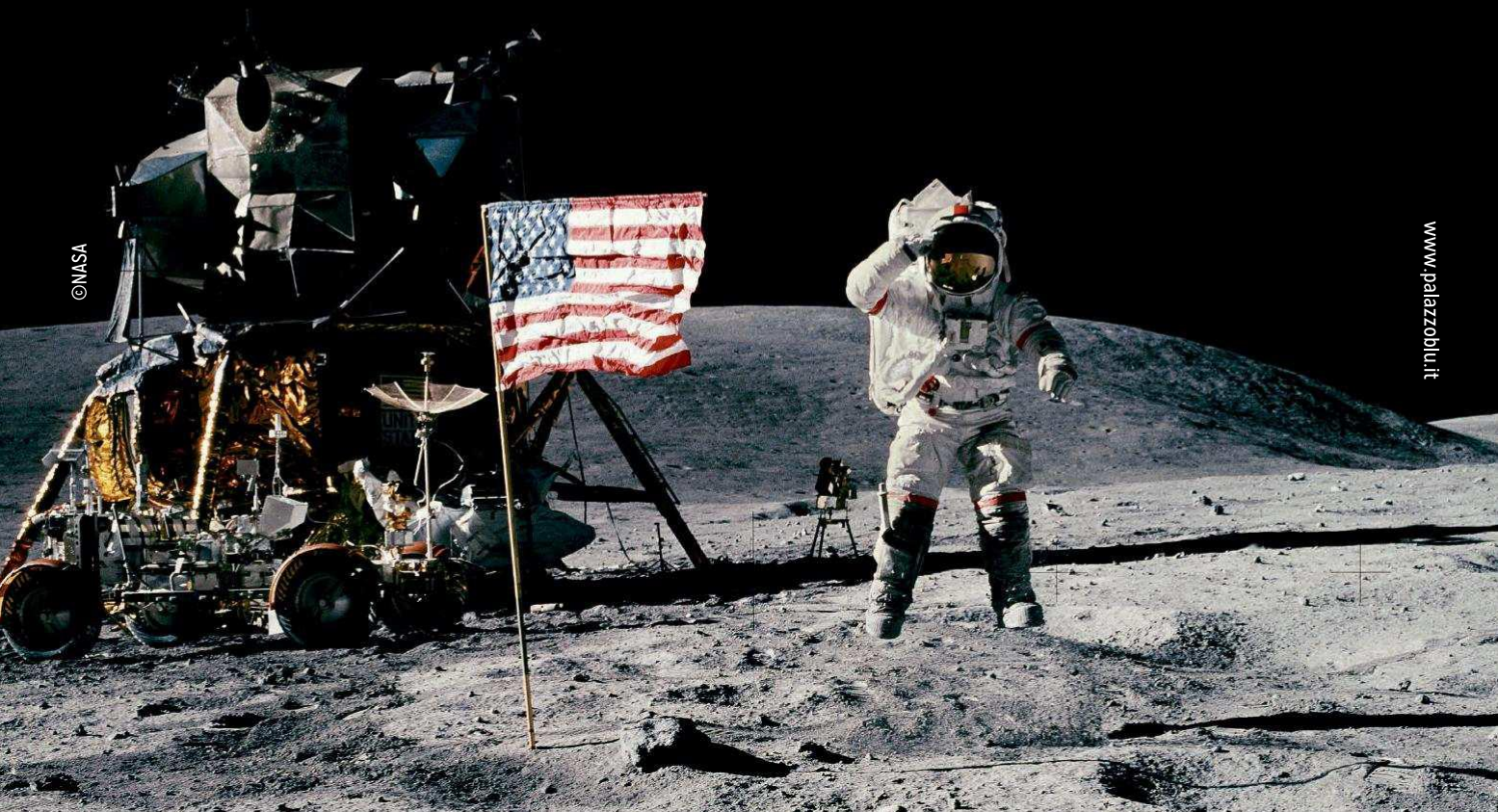
Giovanni Sabato

Il senso della lingua per gli odori nell'aria

Le cellule della lingua contengono, com'è noto da tempo, proteine che convertono un segnale chimico in una sensazione gustativa, ma anche, come si è appena scoperto, proteine che si attivano al passaggio degli odori nell'aria.

Vari studi avevano già dimostrato che queste molecole si trovano, in piccolissime quantità, in zone dell'organismo estranee al senso dell'olfatto (per esempio l'intestino), dove non svolgono la loro abituale funzione. Tuttavia una ricerca pubblicata su «Chemical Senses» ha rivelato che i recettori olfattivi presenti sulla lingua umana e di topo, dove sono numerosi, reagiscono come quelli del naso: se stimolati con sostanze chimiche dall'odore pungente, si attivano.

Le implicazioni di questa scoperta sono molte, la più interessante però forse è quella che riguarda il possibile ruolo di queste proteine nella percezione del gusto. «Al giorno d'oggi consumiamo cibi ricchi di zuccheri, sale e grassi», spiega Mehmet Hakan Ozdener, autore principale dello studio e ricercatore al Monell Chemical Senses Center di Philadelphia, negli Stati Uniti. «Vogliamo capire se i recettori olfattivi della lingua possono modulare il sapore, e quindi influire sul consumo di questi cibi che stanno mettendo in pericolo la salute umana», ha concluso lo scienziato.

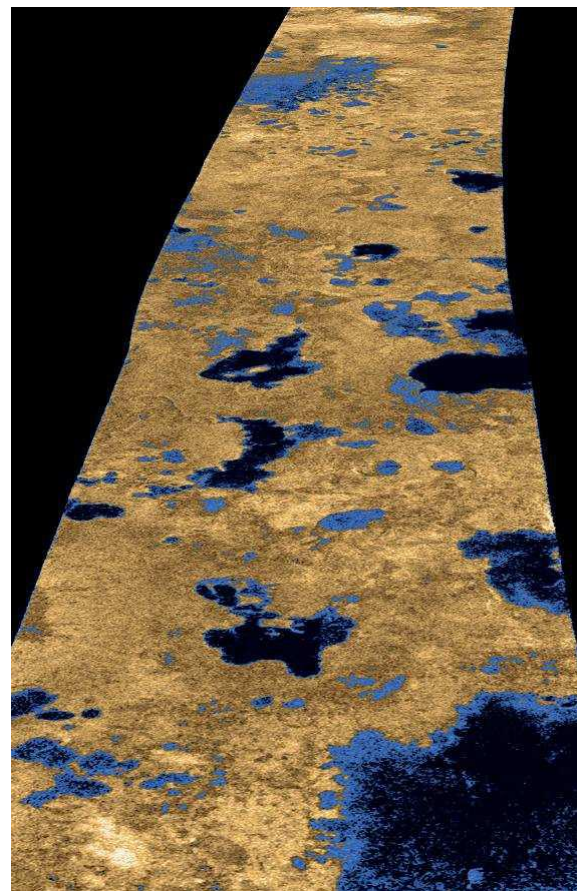
Sara Mohammad

Cortesia Other Ohio State University

SLA: ecco il primo atlante genetico in tre dimensioni

Ricercatori del New York Genome Center (NYGC) hanno completato l'atlante genetico 3D della sclerosi laterale amiotrofica (SLA). Gli scienziati hanno usato un nuovo approccio computazionale, denominato «trascrittomica spaziale», tramite cui mappare l'espressione genica nel tempo e nello spazio di quasi 12.000 geni nel midollo spinale.
Nello studio pubblicato di recente su «Science», Hemali Phatnani e colleghi descrivono come il nuovo metodo di mappatura permetta di cogliere i primissimi cambiamenti provocati dalla SLA, non osservabili con i normali metodi di sequenziamento. Sono stati esaminati quattro momenti della progressione della malattia, dall'inizio dell'età adulta fino allo stadio finale, su oltre 1100 topi con il modello murino della SLA e su campioni di midollo prelevati, post-mortem, da 80 persone affette dalla malattia.
I risultati ottenuti forniscono nuove informazioni sui meccanismi che contribuiscono all'insorgenza e alla progressione della malattia: dove e in quali tipi di cellule si verifica la disfunzione per la prima volta, e come si diffonde attraverso il midollo spinale L'atlante potrà essere utile anche per studiare altre malattie neurodegenerative, come Alzheimer, Parkinson e corea di Huntington. (*EnPr*)

I profondi laghi di Titano sono ricchi di metano

I laghi di idrocarburi di Titano sono più profondi e più ricchi di metano di quanto ipotizzato finora. A dimostrarlo è stata la sonda Cassini – frutto della collaborazione fra NASA, Agenzia spaziale europea e Agenzia spaziale italiana – che nell'ultimo passaggio ravvicinato con il satellite naturale di Saturno, il 22 aprile 2017, ha registrato dati radar e infrarossi per misurare profondità e composizione di alcuni laghi nelle regioni polari settentrionali di Titano. I risultati, elaborati da due gruppi di ricerca, uno guidato da Marco Mastrogiuseppe, del California Institute of Technology di Pasadena, l'altro da Shannon MacKenzie, della Johns Hopkins University, sono stati pubblicati in due studi su «Nature Astronomy».

Unico nel sistema solare, Titano condivide con la Terra la presenza di composti in uno stato liquido stabile in superficie. A differenza del nostro pianeta però, a «bagnare» Titano non è l'acqua, ma sono alcuni idrocarburi. Le osservazioni, oltre a mostrare che alcuni laghi ad alta quota arrivano fino a 100 metri di profondità, evidenziano che altri, meno profondi, sono transienti, con un andamento stagionale. Un'ipotesi è che in parte evaporino, e che in parte gli idrocarburi residui fluiscano nel sottosuolo, creando una riserva naturale per la stagione successiva. (*EmRi*)

Sequenziato il genoma del grano duro

Il grano duro ha più geni di chi lo mangia: 33.000 contro i 20.000 degli esseri umani. È uno dei risultati, pubblicati su «Nature Genetics», del sequenziamento del DNA del *Triticum durum* (il cereale usato per produrre la pasta) realizzato da un consorzio internazionale di ricerca, coordinato da Luigi Cattivelli del Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA).
La lettura del DNA del grano duro è stata un'operazione complessa a causa della sovrabbondanza di geni, derivata dal nascere di *T. durum* come incrocio spontaneo fra due specie selvatiche mediorientali, che hanno sommato i loro cromosomi, poi «perfezionato» dalla selezione operata dai primi agricoltori. «Adesso potremo individuare i geni utili a creare nuove varietà di *T. durum*, una coltura molto importante in tutta l'area mediterranea», ha spiegato Cattivelli. «In particolare vorremmo trovare bersagli su cui intervenire per aumentare la sua resistenza a siccità e temperature elevate, così che si possa continuare a coltivarlo in Nord Africa e Medio Oriente, anche con un clima più caldo e secco».
Altro campo di indagine sarà lo studio dei geni legati alle proteine del glutine, che sono molto abbondanti nel grano duro, rendendolo ottimo per produrre la pasta, ma anche un problema per chi non le tollera: poterle modificare allevierebbe il problema. (*AlSa*)

Cortesia NASA/JPL/USGS (*laghi di Titano*); gorsh13/iStock (*grano duro*)

Robot nanoscopici per curare i tumori

Lo sviluppo di nanoparticelle capaci di raggiungere il punto da curare nel nostro organismo, seguendo il flusso sanguigno, è un filone di ricerca della robotica medica attivo già da oltre un decennio. Di recente però, un gruppo di ingegneri del Massachusetts Institute of Technology di Boston e del Politecnico federale di Zurigo (ETH), in Svizzera, ha creato un nanorobot che amplia il loro raggio d'azione.

In un articolo su «Science Advances», Sangeeta N. Bhatia del MIT e colleghi hanno presentato un robot, grande circa come una cellula, dotato di un'elica che ricorda il flagello di alcuni batteri. La propulsione è assicurata da un campo magnetico, che ha anche la capacità di trascinare, dietro il robot, uno sciame di nanoparticelle da depositare sul punto da curare. L'innovazione di questa soluzione è che il robot può superare la barriera costituita dalle pareti dei vasi sanguigni e colpire tessuti all'esterno di essi, come per esempio i tumori, spesso abbondantemente vascolarizzati. Robot di questo tipo potrebbero essere «caricati» in gran quantità su *stent* posizionati stabilmente nei vasi sanguigni, vicino ai tumori, e poi periodicamente rilasciati e guidati da un campo magnetico esterno sul tessuto da curare. (*RiOl*)

Eruzioni catastrofiche più frequenti per i Campi Flegrei

I Campi Flegrei, l'area vulcanica a nord di Napoli, sono forse la caldera più pericolosa del mondo, con 500.000 persone che vivono in mezzo a decine di bocche eruttive. Rassicurava un po' il fatto che questo supervulcano sembrava generare eruzioni catastrofiche, in grado di coprire mezza Campania con metri di ceneri vulcaniche, solo ogni 25.000 anni circa, visto che le due finora note sono avvenute 39.000 e 15.000 anni fa. Ora però un gruppo coordinato dal vulcanologo Paul Albert, dell'Università di Oxford, è riuscito a dimostrare su «Geology» che anche le abbondanti ceneri vulcaniche trovate intorno al Mediterraneo centrale in strati di 29.000 anni fa, arrivarono dai Campi Flegrei.

«L'identificazione di questa nuova grande eruzione, detta di Masseria del Monte e comparabile a quella di 15.000 anni fa, è avvenuta con indagini stratigrafiche, geochimiche e di datazione di rocce, e con una ricostruzione al computer della dispersione delle ceneri», ha spiegato Roberto Isaia dell'Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia, parte del gruppo. Il periodo fra una eruzione catastrofica e la successiva sembra così scendere a 10.000-15.000 anni, aumentando la possibilità che nei Campi Flegrei se ne verifichi un'altra in un futuro non tanto remoto. (*AlSa*)

Dolce o amaro? La risposta è anche nel DNA

Preferire un caffè a una bevanda gassata non dipende dai geni del gusto ma da quelli coinvolti negli effetti gratificanti di queste diffuse bevande. Lo suggerisce uno studio che ha analizzato centinaia di migliaia di sequenze di DNA e le abitudini di consumo di bevande dolci e amare delle persone da cui provenivano le sequenze.

Marilyn Cornelis della Northwestern University e colleghi erano alla ricerca delle differenze genetiche che possono spiegare perché alcuni preferiscono bevande dal gusto amaro (come caffè, tè e birra) mentre altri optano per *drink* dal sapore dolciastro (come bibite zuccherate e succhi di frutta). Dopo aver visto i risultati degli esperimenti, si sono accorti che la tendenza a consumare il dolce o l'amaro si associava meglio ai geni che controllano il metabolismo dell'alcool e della caffeina (responsabili dell'effetto gratificante di alcolici e caffè), invece che ai geni coinvolti nella percezione gustativa. Lo studio pubblicato su «Human Molecular Genetics», approfondisce il ruolo della genetica e sottolinea l'importanza del sistema della ricompensa nella scelta di cosa bere. (*SaMo*)

xMarshall/iStock

Avere la clorofilla senza avere la fotosintesi

Non c'è da rallegrarsene, ma dato che il 33 per cento delle barriere coralline di tutta la Terra rischia di morire per riscaldamento e acidificazione degli oceani, l'attenzione sui coralli si mantiene alta e capita di scoprire cose nuove. Ricercatori coordinati da Waldan Kwong dell'Università della British Columbia in Canada hanno scoperto nuovi protozoi simbionti dei coralli. Battezzati corallicolidi (*corallicolids*), sono stati individuati con microscopia e analisi genetica nell'80 per cento dei campioni, rappresentativi del 70 per cento dei coralli.

Anche se sono parassiti, spiega lo studio su pubblicato «Nature», i corallicolidi mantengono i plastidi, ovvero gli organelli in cui avviene la fotosintesi. Sono tuttavia plastidi fuori uso, mancando le proteine per la conversione dell'anidride carbonica in zuccheri. A essere rimasti sono solo i quattro geni che codificano per la sintesi del pigmento fotosintetico clorofilla, il che rende i corallicolidi organismi di transizione, a metà tra parassiti e loro progenitori, cellule libere con attività fotosintetica.

Una posizione «scomoda», perché se l'energia catturata dalla clorofilla non è usata si accumula e può danneggiare la cellula.

Un rompicapo biochimico che i ricercatori dovranno risolvere. (*MaSa*)

Far levitare una particella di silice grazie a un fascio laser è un primo passo verso gli esperimenti per studiare la gravità su scale minime. Il progetto è in corso nel laboratorio di Markus Aspelmeyer, all'Università di Vienna.

Gravità quantistica in laboratorio

di Tim Folger

I fisici che cercano di unificare gravità e meccanica quantistica hanno pensato a lungo che fosse impossibile condurre esperimenti pratici, ma adesso nuove proposte offrono una possibilità per mettere alla prova la natura quantistica della gravità su un banco sperimentale

IN BREVE

Per unificare le teorie della meccanica quantistica e della relatività generale, che notoriamente non collaborano fra loro, si dovrà probabilmente raggiungere il regno incredibilmente piccolo della cosiddetta «scala di Planck». Gli esperimenti pratici per sondare questo livello sono stati a lungo ritenuti impossibili, ma grazie a varie nuove idee le cose stanno per cambiare.

I fisici sperano che effettuando misurazioni estremamente precise della gravità in allestimenti su piccola scala – esperimenti fattibili in laboratorio – saranno in grado di rilevare gli effetti dell'intersezione tra gravità e teoria quantistica.

Gli esperimenti hanno lo scopo di mostrare se su scale estremamente piccole la gravità diventa quantizzata, cioè divisibile in quantità discrete.

Fotografie di Mattia Balsamini

Tim Folger è un giornalista *freelance* che scrive per «National Geographic», «Discover» e altre pubblicazioni statunitensi. È anche curatore di *The Best American Science and Nature Writing*, un'antologia annuale pubblicata da Houghton Mifflin Harcourt.

Nel 1797 Henry Cavendish, uno dei più importanti scienziati britannici, costruì un attrezzo per pesare il mondo.

A quel tempo la massa della Terra era sconosciuta, così come la sua composizione. Era per lo più roccia solida? Variava in base alla profondità? L'astronomo Edmond Halley ipotizzò addirittura che la Terra potesse essere cava. Isaac Newton aveva confrontato la massa della Terra con quella di altri corpi del sistema solare e sapeva, per esempio, che quella della Terra era più grande di quella della Luna.

Aveva persino proposto un modo per determinare la massa assoluta della Terra: misurare con grande precisione l'attrazione gravitazionale tra due piccole masse sferiche e poi estrapolare dal risultato la massa della Terra. Newton, però, accantonò rapidamente la propria stessa idea: pensava che l'attrazione tra le sfere fosse troppo piccola per riuscire a rilevarla, anche con masse enormemente grandi. «Anzi, intere montagne non saranno sufficienti a produrre un effetto percettibile», scrisse nel suo capolavoro, i *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, che esponevano i suoi principi della dinamica e della gravità.

Un giorno di agosto, più di un secolo dopo, Cavendish dimostrò che Newton aveva torto. Il dispositivo che aveva costruito in un capanno nella sua tenuta nella zona sud-ovest di Londra era composto da due palle di piombo da 1,6 libbre, cioè circa 725 grammi, fissate alle estremità opposte di un'asta di legno lunga circa 1,80 metri, a sua volta sospesa a un filo assicurato a una trave. Due sfere di piombo molto più pesanti, ognuna del peso di quasi 160 chilogrammi, erano sospese separatamente a circa 23 centimetri di distanza dalle sfere più leggere. Cavendish prevedeva che l'attrazione gravitazionale delle sfere pesanti su quelle più piccole avrebbe fatto ruotare lievemente l'asta di legno, e aveva ragione: si mosse di poco più di 2,5 millimetri.

In questo modo poté misurare direttamente l'attrazione gravitazionale esercitata da ciascuna delle sfere più grandi su quelle più piccole. Poiché già sapeva che la Terra esercitava un'attrazione gravitazionale di 1,6 libbre su ciascuna delle sfere piccole (nel sistema inglese di unità di misura, una libbra è per definizione un'unità di forza), a Cavendish bastava calcolare un semplice rapporto, confrontando la forza gravitazionale tra la sfera piccola e la sfera grande con quella tra la sfera piccola e la Terra. Poiché l'attrazione gravitazionale è direttamente proporzionale a ognuna delle masse, avrebbe potuto usare il rapporto per trovare la massa incognita della Terra. Nel corso di nove mesi ripeté l'esperimento 17 volte, e scoprì che la Terra pesava 13 milioni di miliardi di miliardi di libbre (cioè circa $5{,}9 \times 10^{24}$ chilogrammi), un risultato sostanzialmente identico alle migliori stime moderne.

«È una storia incredibile», commenta Markus Aspelmeyer, che ha ricordato l'esperimento di Cavendish nel corso di una chiamata su Skype. «È stato il primo esperimento di precisione in laboratorio sulla gravità». Il *tour de force* di Cavendish, risalente a 220 anni fa, è una fonte di ispirazione per Aspelmeyer, un fisico dell'Università di Vienna. Come Cavendish, prevede di effettuare un esperimento ambizioso, apparentemente impossibile, che potrebbe cambiare radicalmente ciò che sappiamo della gravità: vuole usare un allestimento su piccola scala – letteralmente su un banco del suo laboratorio – per trovare le prove che la gravità potrebbe essere un fenomeno quantistico.

Delle quattro forze fondamentali dell'universo, la gravità è l'unica che non si può descrivere a partire dalle leggi della meccanica quantistica, la teoria che si applica a tutte le altre forze e particelle note alla fisica: l'elettromagnetismo, l'interazione nucleare forte che lega i nuclei atomici e quella debole che provoca il decadimento radioattivo. Sono tutte quantistiche fino in fondo, mentre la gravità rimane come un unico, misterioso intruso.

Questa eccezione frustra i fisici dai giorni di Albert Einstein, che non riuscì mai a unificare la sua teoria della gravità – la relatività generale – con la meccanica quantistica. La maggior parte dei fisici che attualmente si occupa di questo problema ritiene che l'unificazione avvenga quando facciamo uno zoom sul cosmo fino alla cosiddetta scala di Planck, così chiamata in onore di Max Planck, uno dei fondatori della teoria quantistica. Le distanze sulla scala di Planck sono così esigue – 100 milioni di miliardi di miliardi di volte più piccole di un atomo di idrogeno – che si ritiene che lo spazio-tempo stesso assuma caratteristiche quantistiche.

Circuiti superconduttori (*1*) usati nell'esperimento di levitazione. Si cerca anche di misurare i campi gravitazionali di sfere d'oro del diametro di un millimetro (*2*) per osservare la gravità vicino all'ambito quantistico.

Uno spazio-tempo quantistico non sarebbe più la struttura continua e omogenea descritta dalla relatività generale, bensì avrebbe una grana grossa, come una fotografia digitale che diventa pixelata quando la si ingrandisce. Questa granulosità è un segno distintivo della teoria quantistica, che ripartisce energia, quantità di moto e altre proprietà delle particelle in pacchetti discreti, i quanti. Ma che cos'è di preciso un quanto dello spazio-tempo? Come si fa a misurare il tempo o la distanza se lo spazio e il tempo stessi sono spezzettati come righelli rotti?

«Tutte le nostre teorie fisiche richiedono esplicitamente o implicitamente l'esistenza di righelli e orologi: qualcosa si è verificato qui in questo momento e poi ha fatto questo là in un momento successivo», spiega Miles Blencowe, fisico teorico al Dartmouth College. «Da dove cominciamo se non abbiamo nemmeno un parametro per i tempi o per le distanze?» Lajos Diósi, fisico teorico al Wigner Research Centre for Physics di Budapest, riassume il mistero in questo modo: «Non sappiamo che cosa ci sarà alla scala di Planck, ma sappiamo per certo che ci sarà un totale rimescolamento della continuità dello spazio-tempo.»

Sfortunatamente per i fisici, non c'è modo di osservare i fenomeni alla scala di Planck, quindi non c'è modo di verificare le previsioni delle varie teorie della gravità quantistica per vedere quale di esse possa essere giusta. «Non è che non abbiamo teorie sulla gravità quantistica», chiarisce Carlo Rovelli, fisico teorico all'Università di Aix-Marsiglia. «Le abbiamo eccome. Il problema è che ne abbiamo varie».

In fisica, più grande è la scala di energia di un esperimento, più piccola è la distanza che si può sondare. Sondare direttamente la scala di Planck richiederebbe una macchina con un'energia di oltre 15 ordini di grandezza più grande rispetto a quella del Large Hadron Collider (LHC) del CERN, vicino a Ginevra, il più grande acceleratore di particelle mai costruito, con una circonferenza di 27 chilometri. Come dice un fisico, servirebbe un acceleratore all'incirca delle dimensioni della nostra galassia. Macchine come LHC fanno collidere le particelle quasi alla velocità della luce, e i fisici sperano che fra i detriti dell'urto emerga qualcosa di nuovo. L'approccio di base non è molto diverso dal far esplodere una cassaforte per scoprire che cosa c'è dentro.

I praticanti della fisica da svolgere sul banco di un laboratorio mirano a sostituire la forza bruta con la sottigliezza, come uno scassinatore che ascolti i pistoncini della serratura via via che raggiungono le posizioni giuste. «Per come la vedo io, rinunciamo all'alta energia a favore dell'alta precisione», dice Eric Adelberger, fisico della Washington State University. «C'è la frontiera dell'energia, e c'è la frontiera della precisione. Se riusciamo a misurare qualcosa davvero molto bene, possiamo testare la fisica che si verifica a energie altissime». Attualmente ci sono almeno tre gruppi, fra cui quello di Aspelmeyer, che stanno progettando esperimenti proprio in questa direzione. Gli scienziati sperano che questi progetti raggiungeranno i livelli di precisione necessari per arrivare là dove la gravità diventa quantistica.

Un esperimento mentale

Per capire perché la precisione possa permettere ai fisici di accedere indirettamente a energie più elevate, e quindi a scale più piccole, consideriamo un analogo storico: il moto browniano. In un articolo pubblicato nel 1905 Einstein dimostrò che gli enigmatici movimenti casuali di particelle di polline in un vaso d'acqua si potevano spiegare con le collisioni con le molecole d'acqua, sebbene le molecole stesse fossero di molti ordini di grandezza troppo piccole per potersi osservare direttamente. Aspelmeyer e altri fisici scommettono sul fatto che gli eventi che si verificano alla scala di Planck, troppo piccoli per essere osservabili, possano influire in modo analogo su fenomeni accessibili agli esperimenti

Esperimenti di gravità quantistica

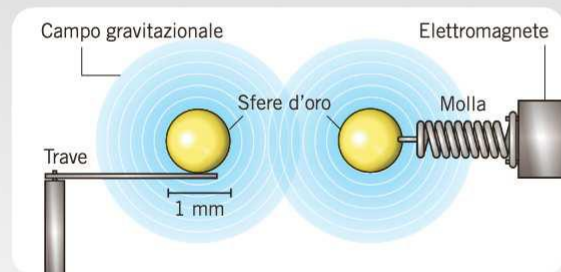
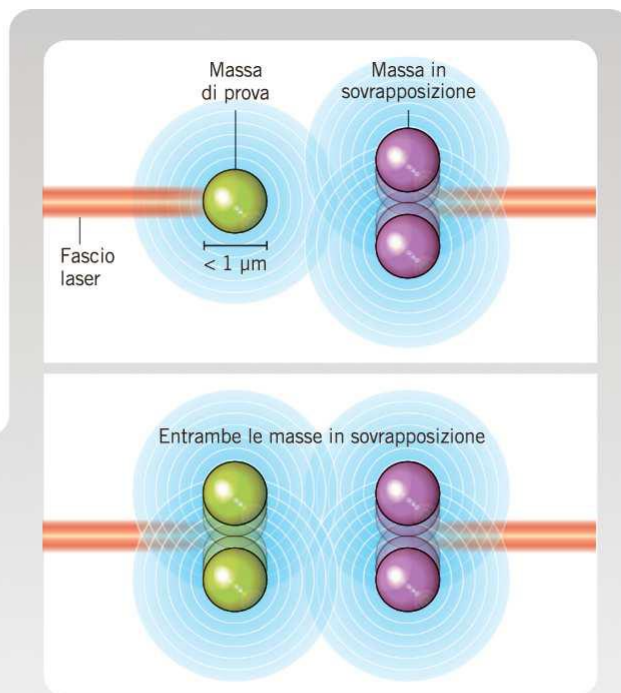
Per capire se la gravità rientra nella meccanica quantistica, i fisici progettano esperimenti per misurare i campi gravitazionali con estrema precisione, in cerca di segni di comportamento quantistico. Tra gli esempi di questo comportamento ci sono la sovrapposizione, la capacità delle particelle quantistiche di occupare due luoghi contemporaneamente, e l'*entanglement*, un tipo di connessione tra oggetti quantistici che ne intreccia i destini. Se si riusciranno a trovare prove di campi gravitazionali in cui si manifesta sovrapposizione o entanglement, si saprà che la gravità ha proprietà quantistiche.

Esperimento preliminare n. 1
Un esperimento, proposto dal fisico Markus Aspelmeyer, tenterà di porre una massa in uno stato di sovrapposizione in cui si trova in due posizioni contemporaneamente, per poi cercare di vedere se anche il campo gravitazionale della massa si scinde in due. Una versione preliminare svilupperà la tecnologia per rilevare i campi gravitazionali di oggetti più piccoli che mai: in questo caso, due minuscole sfere d'oro. Un elettromagnete fissato a una molla farà vibrare una delle palline, mentre l'altra, all'estremità di una trave a sbalzo microscopica, dovrebbe oscillare in risposta alla variazione gravitazionale.

Esperimento definitivo n. 1
L'obiettivo finale è porre una di queste sferette in uno stato di sovrapposizione. Se anche il campo gravitazionale di questa sfera andrà in sovrapposizione ed esisterà in due posizioni diverse, allora l'altra massa dovrebbe sentire l'attrazione di entrambi i campi e ritrovarsi in entanglement, entrando anch'essa in sovrapposizione.

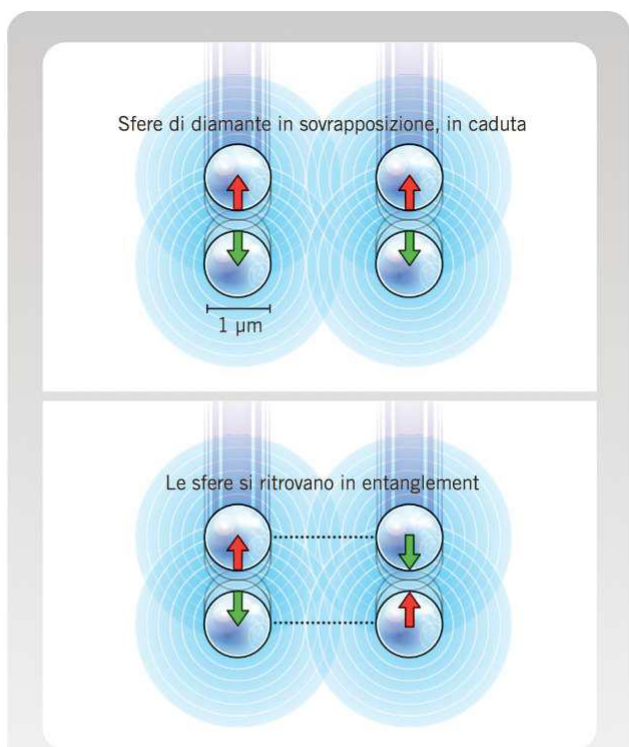
Illustrazione di Ben Gilliland

in laboratorio. E mentre gli acceleratori di particelle non si possono migliorare di vari ordini di grandezza – è improbabile che vedremo acceleratori con una circonferenza di 1000 chilometri – la precisione degli esperimenti in laboratorio potrà facilmente migliorare di qualche ordine di grandezza nei decenni a venire.

Queste migliorie potrebbero permettere ad Aspelmeyer di mettere alla prova un'ipotesi chiave condivisa da tutte le teorie della gravità quantistica: che la gravità stessa manifesti alcune proprietà quantistiche del tutto insolite. «Se questo è vero, dovrebbero esserci conseguenze riguardanti i fenomeni a una scala di energia molto più piccola rispetto alle alte energie che corrispondono alla scala di Planck», e cioè approssimativamente alla scala in cui viviamo noi, secondo Aspelmeyer. «E la domanda è: riusciamo a congegnare esperimenti che possano mettere alla prova queste conseguenze?».

Quello che ha in mente Aspelmeyer è un esperimento che misurerebbe l'attrazione gravitazionale tra due masse sferiche. A differenza di Cavendish, però, Aspelmeyer non peserà la Terra, e le sue masse di qualche milligrammo sono di vari ordini di grandezza più piccole di quelle di Cavendish. Vuole verificare se la gravità interagisce con le proprietà quantistiche di masse piccole. Nello specifico, intende esaminare quale tipo di effetti gravitazionali possa essere generato da un oggetto posto in uno stato analogo a quello del gatto di Schrödinger, in cui si trova contemporaneamente sia in un punto che in un altro.

Nel mondo quantistico, le particelle hanno la straordinaria capacità di essere simultaneamente in due posti: è quella che i fisici chiamano sovrapposizione. Le sovrapposizioni quantistiche sono state osservate molte volte in laboratorio, ma si tratta di stati delicati. Le interazioni con qualsiasi particella vicina fanno sì che gli oggetti in sovrapposizione «collassino» rapidamente in un'unica posizione. Ma finché durano le sovrapposizioni, si chiede Aspelmeyer, che proprietà hanno queste particelle? Per esempio, creano ognuna un proprio minuscolo campo gravitazionale? «Immaginiamo di porre un oggetto in uno stato di sovrapposizione, e poniamoci una domanda: in che modo gravita? Questa è la domanda a cui vogliamo dare una risposta».

L'esperimento che Aspelmeyer spera di realizzare fu proposto per la prima volta come *Gedankenexperiment* – esperimento mentale – dal leggendario fisico Richard Feynman in una conferenza

Esperimento n. 2

Un secondo concetto sperimentale, proposto da due gruppi (Sougato Bose e i suoi colleghi e, indipendentemente, Chiara Marletto e Vlatko Vedral), prevede di far cadere due sfere di diamante fianco a fianco per un paio di secondi. Secondo i fisici, se le sfere sono distanti appena 100 micrometri, la vicinanza dei loro campi gravitazionali dovrebbe far entrare le sfere in entanglement; se ciò accade, l'esperimento rileverà una correlazione tra la direzione dei loro spin dopo la caduta. Se invece le particelle non sono in entanglement – presumibilmente perché per la gravità non vale questo fenomeno quantistico – allora gli spin dovrebbero essere casuali.

del 1957. Secondo il ragionamento di Feynman, se la gravità è davvero un fenomeno quantistico, una sovrapposizione di una particella in due punti diversi contemporaneamente creerebbe due distinti campi gravitazionali. Secondo la teoria della relatività generale, i campi gravitazionali sono distorsioni dello spazio e del tempo. Quindi, nel caso di una piccola massa in una sovrapposizione quantistica, coesisterebbero fianco a fianco due diversi spazio-tempi, quasi come due mini-universi separati, uno stato di cose che non dovrebbe esistere nella teoria di Einstein.

Se si verificasse questa sovrapposizione di spazio-tempi, come interagirebbe un altro oggetto, una massa di prova, proprio con quella sovrapposizione? Il movimento di questa massa mostrerebbe che è sotto l'effetto di due diversi campi gravitazionali? Oppure l'interazione provocherebbe il collasso della sovrapposizione, come ritengono alcuni fisici, avendo come effetto normali dinamiche gravitazionali? Se la sovrapposizione persistesse e la massa di prova interagisse con i campi gravitazionali in sovrapposizione, sarebbe una prova del fatto che massa di prova e sovrapposizione sono entrate in *entanglement*, una proprietà distintiva della meccanica quantistica in cui le caratteristiche di due particelle separate diventano inestricabilmente legate. Secondo Feynman, visto che solo i fenomeni quantistici possono entrare in entanglement, l'esperimento mostrerebbe che la gravità, come tutte le altre forze fisiche conosciute, è fondamentalmente quantistica.

Un risultato di questo tipo di per sé non validerebbe nessuna specifica teoria della gravità quantistica, ma sarebbe un indizio indiretto che alla scala di Planck la gravità è quantizzata. Più in generale, questo esperimento farebbe ritenere che le leggi della meccanica quantistica valgono a tutte le scale, e non solo nel regno degli atomi, dei fotoni e delle altre particelle fondamentali. Alcuni fisici sono fedeli all'idea per cui la meccanica quantistica possa venir meno quando si tratta di descrivere il mondo macroscopico. Roger Penrose, dell'Università di Oxford, e Lajos Diósi, per esempio, hanno ipotizzato che la gravità faccia sì che le sovrapposizioni superiori a una certa dimensione collassino, dividendo di fatto il mondo quantistico da quello classico.

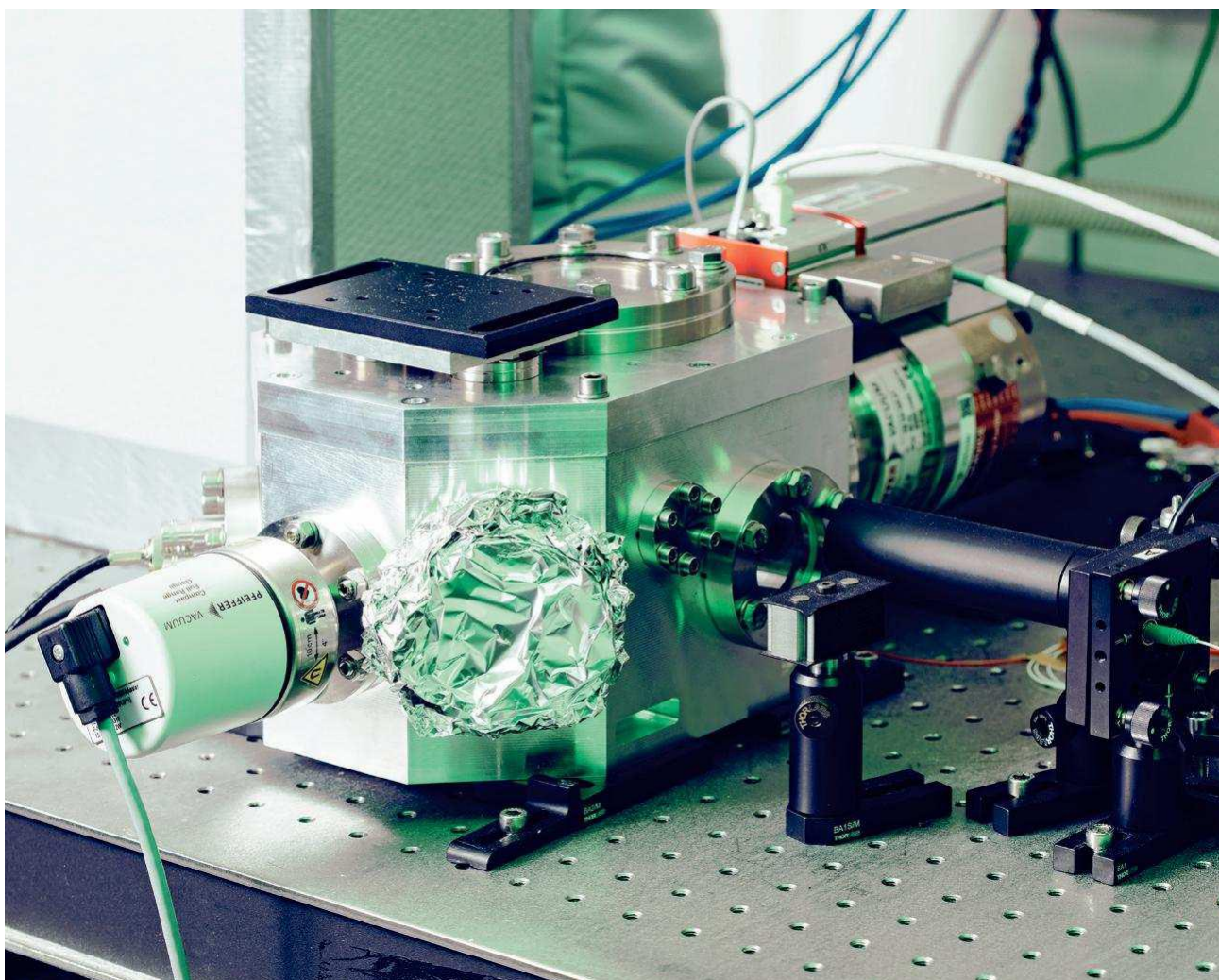
«Una delle aree in cui si ritiene che la teoria quantistica venga meno è proprio quando si tratta di descrivere la gravità», dice Chiara Marletto, fisica teorica a Oxford. «Per vari eminenti scienziati la gravità sarà esattamente il punto in cui smette di funzionare la teoria quantistica. Quindi, invece di avere una teoria quantizzata della gravità, dovremmo di fatto rendere classica la teoria quantistica per descrivere la gravità». In questo approccio, la teoria quantistica potrebbe aver bisogno di essere modificata per renderla coerente con la relatività generale, anziché cercare di inserire la gravità nella teoria quantistica così com'è.

Trasformare il pensiero in realtà

La tecnologia e le competenze necessarie per risolvere il problema non esistevano quando Feynman formulò la sua idea, e ancora oggi il progetto intimorisce per la sua difficoltà. Da anni il laboratorio di Aspelmeyer si dedica a misurare i campi gravitazionali di masse sempre più piccole. È un'impresa difficile: l'enorme gravità della Terra nasconde i campi anche di oggetti relativamente grandi. La massa più piccola per cui finora è stato misurato un campo gravitazionale è una sfera di tungsteno di 700 milligrammi. È circa la massa di una graffetta, o di un chicco di uvetta, oggetti giganteschi rispetto alle particelle quantistiche.

Per realizzare l'esperimento mentale di Feynman, Aspelmeyer e colleghi dovranno lavorare con oggetti molto più piccoli delle graffette. Attualmente stanno sviluppando un prototipo di esperimento per rilevare i campi gravitazionali di sferette d'oro con un diametro di un millimetro (l'oro è stato scelto per la sua densità e la sua purezza) che pesano appena pochi decine di milligrammi. «È una massa decine o centinaia di volte inferiore a quella di qualsiasi altra cosa misurata finora», spiega Aspelmeyer. Nell'esperimento, i ricercatori disporranno due sferette d'oro a pochi millimetri di distanza, una montata su una molla fissata a un piccolo elettromagnete e l'altra all'estremità di una trave a sbalzo (*cantilever*) micromeccanica. Quando l'elettromagnete viene acceso, la sfera sulla molla inizierà a vibrare, generando un campo gravitazionale variabile che a sua volta farà oscillare su e giù la massa sulla trave, come un tuffatore sul trampolino. Il moto della trave micromeccanica, seguito con laser, di fatto amplifica l'attrazione gravitazionale della sfera collegata alla molla, rendendola più facile da rilevare sullo sfondo del campo terrestre.

Dopo aver affinato le capacità di misurazione gravitazionale con masse ordinarie, non quantistiche, la squadra di Aspelmeyer affronterà poi le sovrapposizioni. Se riuscirà a porre in sovrapposizione due sferette, Aspelmeyer potrà verificare come interagi-

scono i loro campi gravitazionali. I risultati potrebbero suggerire che le particelle siano in entanglement, confermando l'intuizione di Feynman sulla natura quantistica della gravità.

Che cosa servirà per portare a termine tutto questo? Per avere una possibilità realistica di creare una sovrapposizione quantistica, Aspelmeyer dovrà portare le sue masse, attualmente di dimensioni millimetriche, fino a frazioni di un micrometro, con una riduzione di un fattore 1000. Allo stesso tempo, lo scienziato avrà bisogno di sovrapposizioni di oggetti grandi a sufficienza da avere campi gravitazionali rilevabili. Per questo probabilmente farà ricorso al talento di un collega di Vienna, Markus Arndt, che detiene il primato per l'oggetto più grande posto finora in sovrapposizione: si tratta di un'enorme molecola contenente più di 800 atomi. E anziché essere fissate a molle e travi, le masse sarebbero sospese nello spazio con «pinzette ottiche», cioè fasci laser fortemente focalizzati.

«Se riesco a rilevare il campo gravitazionale di un oggetto su cui posso avere un controllo quantistico, sono a cavallo», dice Aspelmeyer. «È questo il sogno a lungo termine: non domani, nemmeno tra cinque anni. Partendo sia dall'alto sia dal basso, cioè rendendo sia le masse gravitazionali sempre più piccole sia quelle in sovrapposizione sempre più grandi, pensiamo di sapere come arrivarci, fino al punto di far convergere questi due ambiti. Ora non ci resta che lavorare sodo».

Uno spazio-tempo quantistico non sarebbe più la struttura continua e omogenea descritta dalla relatività generale, bensì avrebbe una grana grossa

Arndt, probabile collaboratore di Aspelmeyer, chiarisce che l'esperimento presenta una serie di sfide: le piccole masse sferiche saranno difficili da isolare gravitazionalmente e saranno soggette all'interazione con qualsiasi superficie vicina. «Ci sono innumerevoli effetti difficili da sopprimere», dice. «Tuttavia bisogna provarci, con qualunque mezzo. Se non iniziamo ora, non ci saremo riusciti fra dieci anni». Arndt confronta il lavoro necessario per riuscirci con quello per la ricerca delle onde gravitazionali, un fenomeno previsto dalla relatività generale di Einstein. Più di tre anni fa il gigantesco Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) ha rilevato finalmente la prima onda gravitazionale, ma la scoperta ha richiesto moltissimo tempo. «Ci sono voluti quarant'anni di lavoro per far funzionare il rivelatore di onde gravitazionali», dice Arndt.

Le camere da vuoto isolano piccole masse dal mondo esterno per misurarne i campi gravitazionali con estrema precisione.

L'ultimo rifugio degli oppositori quantistici

Aspelmeyer non è l'unico fisico che lavora a questo problema. Nel dicembre 2017 due gruppi indipendenti hanno pubblicato i rispettivi risultati, molto simili, sull'esperimento mentale di Feynman. Sougato Bose, dello University College di Londra, insieme ai suoi colleghi, e Marletto e il suo collega di Oxford Vlatko Vedral hanno descritto un modo per verificare l'entanglement gravitazionale tra sovrapposizioni di particelle microscopiche senza doverne misurare i campi gravitazionali.

Nell'esperimento proposto si pongono in sovrapposizione coppie di sfere di diamante con un diametro nell'ordine dei micrometri e le si lascia cadere nel vuoto per un paio di secondi nel campo gravitazionale terrestre. Se le sfere si trovano sufficientemente vicine tra loro – a circa 100 micrometri di distanza, secondo le stime di Bose – i loro campi gravitazionali dovrebbero creare un entanglement tra le particelle. Quando accade, le proprietà delle particelle in entanglement si correlano istantaneamente in modi che non sono possibili nella fisica classica. Lo spin di una particella, per esempio – cioè se punta verso l'alto o verso il basso in un campo magnetico – assume il valore opposto non appena si misura quello del suo partner.

Osservando la frequenza con cui si verificano queste correlazioni – Bose dice che 10.000 prove dovrebbero fornire una risposta – lui, Marletto e Vedral potrebbero essere in grado di determinare se i diamanti in caduta siano effettivamente in entanglement. Ancora una volta, l'entanglement suggerirebbe che la gravità stessa debba avere proprietà quantistiche. «Il nostro lavoro dimostrerà che la gravità è quantistica nel senso che obbedisce al principio di sovrapposizione», dice Bose. L'esperimento affronterà molte delle stesse difficoltà dell'esperimento di Aspelmeyer: sono necessarie grandi sovrapposizioni che durino alcuni secondi per volta e che stiano abbastanza vicini in modo che la gravità possa generare un entanglement tra loro. «Questo rende il tutto molto difficile», dice Bose. «Ma sono sicuro che prima di morire lo vedrò».

In caso di esito positivo, entrambi gli esperimenti darebbero ai fisici la prima prova indiretta che la gravità – e quindi lo spazio-tempo stesso – debba essere quantizzata alla scala di Planck. E questa è una prospettiva entusiasmante per Rovelli e altri teorici della gravità quantistica, che hanno passato anni a lavorare dal punto di vista teorico, senza riscontri sperimentali. «Penso che questa idea sia un punto di svolta; il tentativo di osservare la gravità quantistica in laboratorio», dice Rovelli. «Per quanto ne sappiamo la natura quantistica della gravità dovrebbe essere davvero reale, altrimenti non abbiamo capito niente del mondo».

Un secolo dopo la nascita, la meccanica quantistica rimane la più sconcertante delle teorie scientifiche. Alcuni fisici, fra i quali notoriamente Einstein, dubitavano che potesse essere la spiegazione definitiva sulla natura della realtà, tuttavia ormai innumerevoli esperimenti hanno confermato le previsioni della teoria, in genere con una precisione corrispondente a numerose cifre significative. In un certo senso, la domanda se la gravità sia quantistica o classica rappresenta un ultimo rifugio per chi pensa che nella meccanica quantistica debba esserci qualcosa di sbagliato. Se questi esperimenti in laboratorio avranno successo, allora il rifugio crollerà.

«La meccanica quantistica ci insegna un modo completamente diverso di descrivere quello che si può dire sulla natura», dice Aspelmeyer. «Le regole che abbiamo trovato tramite la teoria quantistica sono fondamentali e devono valere in generale per tutte le teorie che abbiamo». ■

PER APPROFONDIRE

A Micromechanical Proof-of-Principle Experiment for Measuring the Gravitational Force of Milligram Masses. Schmöle J. e altri, in «Classical and Quantum Gravity», Vol. 33, n. 12, articolo n. 125031, 23 giugno 2016. **https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0264-9381/33/12/125031.**

Gravitationally Induced Entanglement between Two Massive Particles Is Sufficient Evidence of Quantum Effects in Gravity. Marletto C. e Vedral V., in «Physical Review Letters», Vol. 119, n. 24, articolo n. 240402, 15 dicembre 2017. Preprint disponibile a: **https://arxiv.org/abs/1707.06036.**

Spin Entanglement Witness for Quantum Gravity. Bose S. e altri, in «Physical Review Letters», Vol. 119, n. 24, articolo n. 240401, 15 dicembre 2017. Preprint disponibile a: **https://arxiv.org/abs/1707.06050.**

Grovigli nello spazio-tempo. Moskowitz C., in «Le Scienze» n. 583, marzo 2017.

Attraversando il confine quantistico. Folger T., in «Le Scienze» n. 602, ottobre 2018.

NEUROTECNOLOGIE

La macchina delle intenzioni

Una nuova generazione di interfacce cervello-macchina può dedurre che cosa vuole fare una persona

di Richard Andersen

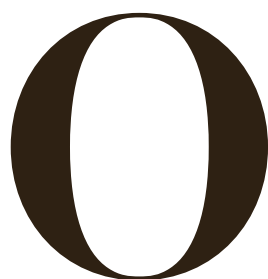
Illustrazione di Mark Ross

IN BREVE

Le interfacce cervello-macchina, o BMI, possono inviare e ricevere messaggi da e verso i circuiti neurali.

Le attuali BMI offrono una registrazione imprecisa o lenta dell'attività cerebrale.

Nuovi studi collocano le BMI in aree del cervello che elaborano le intenzioni di movimento di una persona, rendendo la tecnologia più versatile per pazienti con lesioni al midollo spinale.

Richard Andersen è James G. Boswell Professor di neuroscienze e *Leadership chair* e direttore del Tianqiao and Chrissy Chen Brain-Machine Interface al California Institute of Technology. Studia i meccanismi neurali di vista, udito, equilibrio, tatto e azione e lo sviluppo di protesi neurali. È membro della National Academy of Sciences e dell'American Academy of Arts and Sciences.

Ogni volta che lo vedo mi viene la pelle d'oca. Un volontario paralizzato su una sedia a rotelle controlla un computer o un braccio robotico semplicemente con il pensiero, una dimostrazione dell'interfaccia cervello-macchina (o BMI, da *brain-machine interface*) in azione. Questo accadeva nel 2013, nel mio laboratorio, mentre Erik Sorto, vittima di una ferita d'arma da fuoco quando aveva 21 anni, usava esclusivamente i suoi pensieri per bere una birra senza aiuto. Era la prima volta dopo più di dieci anni.

L'interfaccia cervello-macchina inviava un messaggio neurale da un'area corticale di livello superiore; poi un'appendice elettromeccanica riusciva ad allungare il braccio e ad afferrare la bottiglia, portandola alle labbra di Sorto, prima che ne bevesse un sorso. La sua bevuta è avvenuta un anno dopo un intervento chirurgico per impiantare elettrodi nel suo cervello per controllare i segnali che dirigono i pensieri che avviano il movimento motorio. I miei colleghi di laboratorio e io lo guardavamo meravigliati mentre completava questa sfida ingannevolmente semplice, ma che in realtà è laboriosamente complessa.

Assistere a un'impresa del genere solleva immediata la domanda su come fanno semplici pensieri a controllare una protesi meccanica. Muoviamo i nostri arti senza esitazione ogni giorno, e completare questi movimenti con naturalezza è l'obiettivo di qualsiasi sofisticata BMI. Tuttavia, sono decenni che i neuroscienziati provano a decodificare i segnali neurali che avviano i movimenti per raggiungere e afferrare oggetti. Il successo limitato nella lettura di questi segnali ha indotto a cercare nuove strade per accedere all'attività elettrica cacofonica che risuona mentre gli 86 miliardi di neuroni del cervello comunicano. Una nuova generazione di BMI promette, oggi, di creare un legame continuo tra cervello e protesi, accedendo con grande precisione alle regioni neurali che elaborano le azioni: non importa che l'obiettivo desiderato sia afferrare una tazza oppure fare un passo.

Dal cervello al robot

Una BMI opera inviando e ricevendo – «scrivendo» e «leggendo» – messaggi da e verso il cervello. Ci sono due classi principali di tecnologie di interfaccia. Una BMI di «codifica» impiega, in genere, la stimolazione elettrica per trasmettere un segnale al tessuto neurale. Applicazioni cliniche efficaci di questa tecnologia sono già in uso: la protesi cocleare stimola il nervo acustico per consentire alle persone sorde di udire; la stimolazione del cervello profondo di un'area che controlla l'attività motoria – i gangli basali – tratta alcuni disturbi motori, come il morbo di Parkinson o il tremore essenziale; dispositivi che stimolano la retina sono impiegati nei trial clinici per alleviare alcune forme di cecità.

Dal canto loro, le BMI di «decodifica» registrano l'attività neurale, e sono ancora in fase di sviluppo. Dovremo affrontare le sfide, uniche, della lettura dei segnali neurali prima che questa tecnologia di prossima generazione raggiunga i pazienti. Ci sono già tecniche approssimative di decodifica: l'elettroencefalogramma (EEG) registra l'attività media a distanza di centimetri sopra il tessuto cerebrale, cogliendo l'attività di molti milioni di neuroni, e non di singoli neuroni in un singolo circuito; la risonanza magnetica funzionale (fMRI) è una misurazione indiretta, che registra un aumento del flusso sanguigno verso una regione attiva. Può rappresentare, per immagini, aree più piccole rispetto all'EEG, ma la sua risoluzione è ancora bassa: le variazioni di flusso sanguigno sono lente, e quindi la fMRI non distingue mutamenti rapidi di attività cerebrale.

Per superare questi limiti, ogni laboratorio che studia le BMI vorrebbe idealmente registrare l'attività di singoli neuroni. Osservare i cambiamenti della frequenza con cui numerosi singoli neuroni si attivano può offrire il ritratto più completo di che cosa sta avvenendo in una specifica regione cerebrale. Da qualche anno, matrici di sottili elettrodi impiantati nel cervello permettono, per la prima volta, questo tipo di registrazione. Le matrici oggi in uso sono superfici piatte di 4 millimetri per 4, con 100 elettrodi. Ciascun elettrodo – che ha lunghezza variabile tra 1 e 1,5 millimetri – emerge dalla superficie piatta, e l'intera matrice, simile a un letto da fachiro in miniatura, può registrare l'attività di un numero di neuroni tra 100 e 200.

I segnali registrati da questi elettrodi procedono verso i «decodificatori», che usano algoritmi matematici per tradurre una varietà di attività elettriche di singoli neuroni in un segnale che avvia un particolare movimento, per esempio il controllo di un arto robotico o di un computer. Queste BMI di decodifica assisteranno pazienti che hanno subìto un danno cerebrale causato da lesioni al midollo spinale, da un ictus, dalla sclerosi multipla, dalla sclerosi laterale amiotrofica e dalla distrofia muscolare di Duchenne.

Nel nostro laboratorio ci siamo concentrati su persone con lesioni al midollo spinale superiore, che non riescono più a muovere gli arti superiori e quelli inferiori (tetraplegici). Abbiamo effet-

La tecnologia di interfaccia sviluppata da Richard Andersen al Caltech (*a sinistra*) e dal suo gruppo ha permesso a Erik Sorto (*a destra*) di muovere un braccio robotico.

Lance Hayashida e California Institute of Technology

tuato registrazioni dalla corteccia cerebrale, la superficie spessa circa 3 millimetri dei due voluminosi emisferi del cervello. Se la appiattissimo, la corteccia di ciascun emisfero misurerebbe circa 80.000 millimetri quadrati. Il numero di regioni corticali specializzate nel controllo di specifiche funzioni cerebrali è aumentato, essendo stati raccolti ulteriori dati: oggi stimiamo che includa più di 180 aree. Queste ultime sono specializzate nell'elaborazione dell'informazione sensoriale, nella comunicazione verso altre regioni del cervello, nei processi cognitivi, nella presa di decisioni o nell'invio di comandi per avviare un'azione.

In breve, una BMI può interagire con molte sedi nella corteccia. I segnali sensoriali sono elaborati nelle aree corticali primarie. Queste regioni rivelano l'angolatura e l'intensità della luce che colpisce la retina, oppure la sensazione innescata in una terminazione nervosa periferica. Possibili bersagli sono anche le cortecce associative densamente connesse, e situate tra le aree primarie, che sono specializzate nel linguaggio, nel riconoscimento di oggetti, nella emotività e nel controllo esecutivo della presa di decisioni.

Una manciata di gruppi di ricerca ha cominciato a registrare popolazioni di singoli neuroni in pazienti paralizzati, permettendo loro di azionare una protesi nel contesto controllato di un laboratorio. Ci sono ancora grandi ostacoli da superare prima di poter dotare un paziente di una protesi neurale con la stessa facilità di un *pacemaker* cardiaco. Nel mio gruppo stiamo svolgendo registrazioni dirette dalle aree associative, invece che dalla corteccia motoria, oggetto di studio di altri laboratori. In questo modo ci auguriamo di poter aumentare la velocità e la versatilità nel rilevare la scarica di segnali neurali che trasmettono le intenzioni di un paziente.

L'area di associazione specifica studiata dal mio gruppo è la corteccia parietale posteriore (o PPC, da *posterior parietal cortex*), dove iniziano i piani per avviare i movimenti. Nel nostro lavoro con i primati non umani abbiamo scoperto una «mappa» in una sottoarea della PPC, la corteccia intraparietale laterale, che riconosce le intenzioni di avvio dei movimenti oculari. L'elaborazione legata al movimento avviene altrove nella PPC. La regione parietale di raggiungimento prepara i movimenti del braccio. Hideo Sakata, quando lavorava alla Nihon University School of Medicine, ha scoperto con i colleghi che l'area intraparietale anteriore elabora i movimenti di presa.

La PPC fornisce diversi possibili vantaggi per il controllo cerebrale della robotica o di un cursore di un computer. Controlla entrambe le braccia, a differenza della corteccia motoria di ciascun emisfero – l'area indagata dagli altri laboratori – che attiva l'arto nella parte opposta del corpo. La PPC indica anche l'obiettivo di un movimento. Quando, per esempio, si induce visivamente un primate non umano a raggiungere un oggetto, quest'area cerebrale si attiva immediatamente, segnalando la posizione di un oggetto desiderato. Viceversa, la corteccia motoria trasmette un segnale per la via che dovrebbe seguire il movimento di raggiungimento. Conoscere l'obiettivo di un'azione motoria intenzionale permette alla BMI di decodificarla rapidamente entro circa 200 millisecondi, mentre cogliere il segnale della traiettoria dalla corteccia motoria può richiedere più di un secondo.

Dal laboratorio al paziente

Non è stato facile passare dagli esperimenti con animali di laboratorio agli studi sulla PPC nell'essere umano: sono trascorsi 15 anni prima che realizzassimo il primo impianto umano. Per prima cosa abbiamo inserito in primati non umani sani le stesse matrici di elettrodi che avevamo pianificato di usare nell'essere uma-

no. Poi le scimmie hanno imparato a controllare cursori del computer o arti robotici.

Abbiamo formato un gruppo con scienziati, clinici ed esperti di riabilitazione provenienti da California Institute of Technology (Caltech), University of Southern California a Los Angeles, Università della California a Los Angeles (UCLA) e Rancho Los Amigos National Rehabilitation Center e Casa Colina Hospital and Centers for Healthcare, sempre in California. Il gruppo ha ricevuto il via libera dalla statunitense Food and Drug Administration e le commissioni di revisione istituzionali si sono incaricate di giudicare sicurezza ed etica della procedura nei laboratori, negli ospedali e nelle cliniche di riabilitazione coinvolti.

Un volontario in questo tipo di progetto è un vero pioniere, perché potrebbe non ricavarne alcun beneficio. I partecipanti, in definitiva, contribuiscono ad aiutare gli utenti della tecnologia, che la sceglieranno quando sarà perfezionata per l'uso quotidiano. L'intervento chirurgico di impianto su Sorto, il nostro primo volontario, è avvenuto nell'aprile 2013, ed è stato eseguito dai neurochirurghi Charles Liu e Brian Lee. La procedura è andata avanti senza intoppi; poi, però, si è dovuta attendere la guarigione, prima di poter provare il dispositivo.

I miei colleghi del Jet Propulsion Laboratory della NASA, che hanno costruito e inviato i *rover* su Marte, raccontano dei circa sette minuti di terrore quando un rover entra nell'atmosfera del pianeta, prima di atterrare. Nel mio caso sono state due settimane di trepidazione, a domandarmi se l'impianto avrebbe funzionato. Sapevamo come funzionavano nei primati non umani aree simili del cervello, ma un impianto nell'essere umano significava navigare a vista: nessuno aveva mai provato a registrare una popolazione di neuroni della PPC.

Nel primo giorno di prova abbiamo rilevato l'attività neurale, ed entro la fine della settimana vi erano segnali da un numero sufficiente di neuroni per stabilire se Sorto poteva controllare un arto robotico. Alcuni neuroni variavano la propria attività quando Sorto immaginava di ruotare la mano. Il suo primo compito è consistito nel ruotare la mano del robot, con differenti orientamenti, per stringere la mano a un giovane laureato. Era emozionato, come del resto lo eravamo noi. Questo traguardo segnava la prima volta, dal tempo della lesione, in cui Sorto poteva interagire col mondo usando il movimento corporeo di un braccio robotico.

Spesso le persone mi domandano quanto tempo ci vuole per imparare a usare una BMI. A dire il vero la tecnologia ha funzionato fin da subito. Era intuitiva, ed era facile usare i segnali intenzionali del cervello per controllare il braccio robotico. Immaginando azioni differenti, Sorto poteva osservare le registrazioni di singoli neuroni dalla sua corteccia e attivarli e disattivarli a piacere.

All'inizio di uno studio, chiediamo ai partecipanti che cosa vorrebbero realizzare controllando un robot. Quanto a Sorto, voleva riuscire a bere una birra da solo, senza dover chiedere aiuto a nessuno. È riuscito in questa impresa dopo circa un anno di partecipazione allo studio. Con il gruppo guidato anche dallo scienziato Spencer Kellis, del Caltech, che includeva esperti di robotica dell'Applied Physics Laboratory alla Johns Hopkins University, abbiamo fuso i segnali d'intenzione di Sorto con il potere di elaborazione offerto dalla tecnologia della visione artificiale e della robotica intelligente.

L'algoritmo della visione analizza gli input da videocamere, e il robot intelligente combina il segnale intenzionale con algoritmi informatici per avviare il movimento del braccio robotico. Sorto ha realizzato questo obiettivo dopo un anno, tra gli incoraggia-

COME FUNZIONA

Con la forza del pensiero

Già 15 anni fa i neuroscienziati avevano costruito un'interfaccia cervello-macchina (BMI) che permetteva ai segnali neurali di spostare un cursore sul computer e di azionare protesi. La tecnologia è progredita lentamente perché tradurre le scariche elettriche dei neuroni in comandi per giocare con un videogioco o per muovere un braccio robotico sono processi molto complessi.

Un gruppo di ricerca al California Institute of Technology (Caltech) ha provato a sviluppare il campo della neuroprostetica, accedendo all'elaborazione neurale di alto livello – l'intenzione cosciente di iniziare un'azione – e trasmettendo poi i relativi segnali elettrici a un braccio robotico. Invece di inviare segnali dalla corteccia motoria per muovere un braccio, come hanno provato in altri laboratori, i ricercatori del Caltech collocano gli elettrodi nella corteccia parietale, che trasmette a una protesi l'intenzione del cervello ad agire.

Decodificare i segnali neurali resta una sfida per i neuroscienziati. Ma usare segnali di controllo della BMI dalla corteccia parietale, che si trova al vertice della catena di comando cognitiva, sembra produrre un controllo più versatile della tecnologia prostetica.

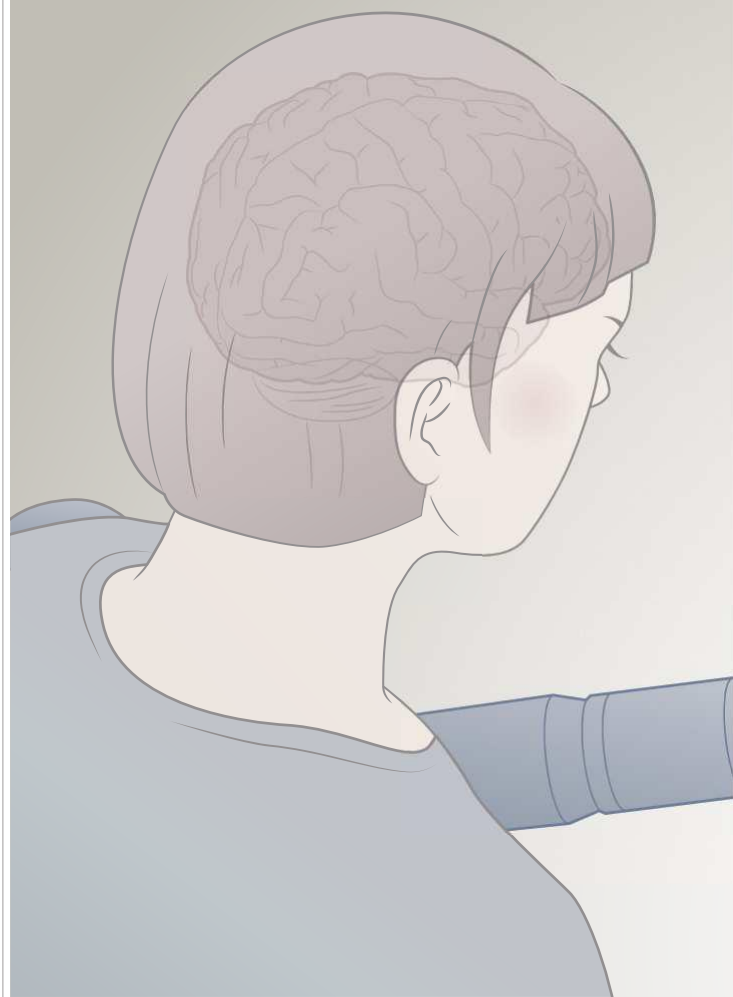
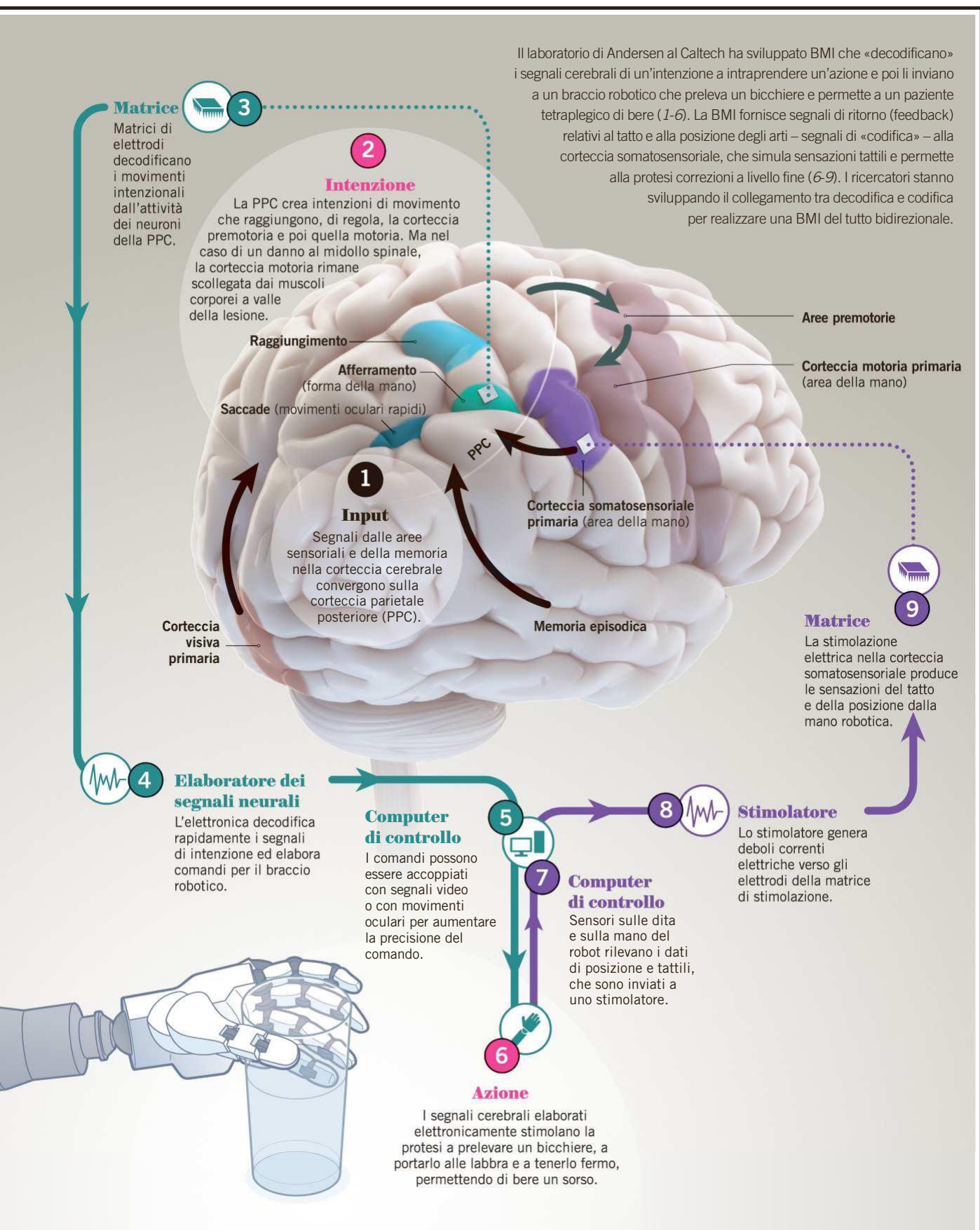



Illustrazione di AXS Biomedical Animation Studio

menti e le grida di gioia dei presenti. Nel 2015 abbiamo pubblicato su «Science» i primi risultati sull'uso dei segnali intenzionali dalla PPC per controllare protesi neurali.

Sorto non è il solo utente della nostra tecnologia. Nancy Smith, ora al quarto anno dello studio che la riguarda, è diventata tetraplegica per un incidente d'auto una decina di anni fa. Prima era insegnante di computer grafica alle scuole superiori e suonava il pianoforte per diletto. Nei nostri studi, che avevano come direttore del gruppo Tyson Aflalo del Caltech e Nader Pouratian della UCLA, abbiamo individuato una rappresentazione dettagliata delle singole dita di entrambe le mani nella PPC di Smith. Usando la realtà virtuale, la donna poteva immaginare e muovere le dieci dita singolarmente sulle mani «avatar» sinistra e destra rappresentate sullo schermo di un computer. Usando il movimento immaginato delle cinque dita di una mano, Smith poteva suonare melodie semplici su una tastiera per pianoforte generata al computer.

Come il cervello rappresenta gli obiettivi

Eravamo entusiasti di collaborare con questi pazienti per trovare neuroni sintonizzati sull'elaborazione di segnali correlati alle intenzioni di ciascun paziente. La quantità di informazioni che si potevano raccogliere da poche centinaia di neuroni soltanto si è rivelata immensa. Potevamo decodificare una gamma di attività cognitive, tra cui la strategia mentale (il movimento immaginato rispetto a quello tentato), i movimenti delle dita, le decisioni sulla rievocazione di stimoli visivi, le posture della mano per afferrare, le azioni osservate, parole di azione come «afferrare» o «spingere», e calcoli matematici. Con nostra sorpresa, l'inserimento di alcune sottili matrici di elettrodi ci ha permesso di decodificare buona parte di quello che una persona intende fare.

La questione di quanta informazione si può registrare da una piccola zona di tessuto cerebrale mi ha fatto venire in mente un problema scientifico simile che avevo incontrato a inizio carriera. Appena laureato, durante il tirocinio con Vernon Mountcastle alla Johns Hopkins School of Medicine, abbiamo esaminato come lo spazio visivo è rappresentato nella PPC di scimmie. I nostri occhi sono una sorta di videocamera, in cui le retine fotosensibili segnalano la posizione di stimoli visivi che vi si proiettano: l'intera immagine è detta mappa retinotopica. I neuroni rispondono a regioni limitate della retina, che sono definite come loro campi recettivi. Per altri versi, elaborare la percezione visiva è differente dalla registrazione di una videocamera. Quando una videocamera è in movimento, anche l'immagine registrata si muove; quando muoviamo gli occhi, però, il mondo sembra stabile. L'immagine retinotopica generata dagli occhi deve essere convertita in una rappresentazione visiva dello spazio che considera dove gli occhi stanno guardando in modo che, mentre essi si muovono, il mondo non dà l'impressione di scivolare via.

La PPC è un centro essenziale per elaborare la rappresentazione dello spazio visivo di ordine superiore. Per raggiungere con la mano e afferrare un oggetto, il cervello deve considerare dove gli occhi stanno guardando, per prenderlo. Lesioni nella PPC umana generano un movimento di raggiungimento impreciso. Nel laboratorio di Mountcastle abbiamo scoperto che singoli neuroni della PPC avevano campi recettivi che registravano parti di una scena. Le stesse cellule trasmettevano anche informazioni sulla posizione degli occhi. I due segnali interagivano moltiplicando la risposta visiva per la posizione degli occhi nella testa, il cui prodotto è detto guadagno di campo.

Ho continuato ad approfondire questo problema – capire la rappresentazione dello spazio del cervello – dopo avere ottenuto un posto al Salk Institute, proprio di fronte all'Università della California a San Diego (UCSD). Collaborando con David Zipser – neuroscienziato teorico dell'UCSD che sviluppa reti neurali – abbiamo descritto su «Nature» un modello computazionale di rete neurale che combinava posizioni retinotopiche con la direzione dello sguardo per creare mappe dello spazio invarianti rispetto ai movimenti oculari. Durante l'addestramento delle reti neurali, i loro strati intermedi hanno sviluppato guadagni di campo, proprio come negli esperimenti con la PPC. Mescolando segnali relativi agli input visivi e alle posizioni degli occhi entro gli stessi neuroni, nove neuroni appena rappresentavano l'intero campo visivo.

Recentemente questa teoria delle rappresentazioni miste – popolazioni di neuroni rispondenti a molteplici variabili (come per i guadagni di campo) – ha risvegliato l'attenzione. Per esempio, registrazioni nella corteccia prefrontale mostrano una mescolanza di due tipi di compiti di memoria e di oggetti visivi differenti.

In più, questo lavoro potrebbe avere una rilevanza diretta per spiegare che cosa succede nella PPC. Lo abbiamo scoperto dopo avere chiesto a Smith, usando un insieme di istruzioni scritte, di eseguire otto differenti combinazioni di un compito. Uno dei quali richiedeva di concepire una strategia per immaginare o per provare un'azione; un altro compito richiedeva di raggiungere il lato destro e quello sinistro del corpo; un terzo prevedeva di stringere una mano o di alzare una spalla. Abbiamo scoperto che i neuroni della PPC mescolavano tutte queste variabili; e l'interazione manifestava uno schema specifico, a differenza delle interazioni casuali che noi e altri avevamo riferito in esperimenti con animali di laboratorio.

L'inserimento di alcune sottili matrici di elettrodi ci ha permesso di decodificare buona parte di quello che una persona intende fare

Le attività di popolazioni di neuroni per esercitare una strategia e per controllare ciascun lato del corpo tendono a sovrapporsi. Se un neurone scarica per iniziare il movimento della mano sinistra, risponderà molto probabilmente a un tentativo di movimento della mano destra, a differenza dei gruppi di neuroni che controllano la spalla e la mano, più separati. Definiamo questo tipo di rappresentazione «selettività parzialmente mista». Da allora abbiamo scoperto somiglianze in rappresentazioni parzialmente miste che sembrano costituire una semantica del movimento. L'attività di cellule sintonizzate per lo stesso tipo di azione tende a sovrapporsi: un neurone che risponde a video di una persona che afferra un oggetto si attiverà probabilmente anche quando una persona legge la parola «afferrare». Ma cellule che rispondono a un'azione come quella di spingere restano in linea di massima separate nel proprio gruppo. In generale, una codifica parzialmente mista sembra alla base di computazioni simili (i movimenti della mano sinistra sono simili a quelli della mano destra). Inoltre, separa quelle che manifestano forme varianti di elaborazione neurale (il movimento della spalla differisce dal movimento della mano).

La codifica mista e quella parzialmente mista sono state individuate in parti specifiche della corteccia associativa, e nuovi studi devono esplorare se compaiono in altre sedi che presiedono a linguaggio, riconoscimento di oggetti e controllo esecutivo. Vorremmo poi sapere se le regioni sensoriali primarie o le regioni motorie corticali usano una struttura parzialmente mista simile.

In un prossimo futuro, un altro obiettivo sarà scoprire fino a che punto imparare nuovi compiti influisce sulla prestazione dei volontari che usano la protesi. Se l'apprendimento avviene rapidamente, qualsiasi area del cervello potrebbe essere impiantata e addestrata per qualsiasi compito concepibile con la BMI: un impianto nella corteccia visiva primaria potrebbe imparare a controllare compiti non visivi. Ma se l'apprendimento è più circoscritto, un impianto in un'area motoria, per esempio, sarebbe addestrato solo per compiti motori. I primi risultati lasciano intendere che un impianto andrebbe collocato nell'area identificata in precedenza come area di controllo di attività cognitive specifiche.

Codificare sensazioni

Una BMI non deve limitarsi solo a ricevere e a elaborare segnali cerebrali: deve anche inviare segnali di ritorno, il *feedback*, da una protesi al cervello. Quando protendiamo una mano per afferrare un oggetto, il feedback visivo aiuta a dirigerla sul bersaglio. Il suo posizionamento dipende dalla forma dell'oggetto da afferrare. Se la mano non riceve segnali sul tatto o sulla posizione dell'arto, una volta che inizia a manipolare l'oggetto, la prestazione peggiora rapidamente.

Scoprire un modo per correggere questo deficit è decisivo per i nostri volontari con lesioni al midollo spinale, che non possono muovere il corpo al di sotto della lesione. Inoltre, essi non percepiscono le sensazioni tattili né la posizione del corpo, che sono essenziali per un movimento fluido. Una protesi neurale ideale dovrà compensare con segnali bidirezionali: dovrà trasmettere le intenzioni del volontario, ma anche rilevare le informazioni tattili e di posizione in arrivo dai sensori su un arto robotico.

Nel prossimo futuro, un altro obiettivo sarà scoprire fino a che punto imparare nuovi compiti influisce sulla prestazione dei volontari che usano la protesi

Robert Gaunt e i colleghi dell'Università di Pittsburgh hanno recentemente affrontato la questione impiantando matrici di microelettrodi nella corteccia somatosensoriale di una persona tetraplegica, dove gli input dagli arti elaborano le sensazioni del tatto. Nel laboratorio di Gaunt gli scienziati hanno inviato deboli correnti elettriche attraverso i microelettrodi, e il soggetto ha riferito sensazioni da parti della superficie della mano.

Abbiamo anche usato impianti simili nella regione del braccio nella corteccia somatosensoriale. Con nostra piacevole sorpresa, il nostro soggetto, FG, ha riferito sensazioni naturali, come compressioni, picchiettii e vibrazioni sulla pelle: le cosiddette sensazioni cutanee. Ha percepito anche la sensazione che l'arto si stesse muovendo, una sensazione conosciuta come propriocezione. Questi esperimenti dimostrano che i soggetti che hanno perso la sensazione negli arti possono riacquisirla tramite BMI che codificano percezioni. Il passo successivo sarà usare mani robotiche cariche di sensori per verificare se il feedback somatosensoriale migliora la destrezza robotica sotto il controllo cerebrale. Inoltre vorremmo sapere se i soggetti percepiscono un senso di *embodiment*, di incorporazione, per cui l'arto robotico sembra diventare parte del loro corpo.

Un'altra sfida importante sarà sviluppare elettrodi migliori per inviare e ricevere segnali neurali. Abbiamo riscontrato che gli impianti continuano a funzionare per la durata relativamente lunga di cinque anni. Ma elettrodi migliori dovrebbero aumentare ancora di più la longevità di questi sistemi e il numero di neuroni registrabili. Un'altra priorità – l'aumento della lunghezza dei minuscoli aghi degli elettrodi – contribuirebbe ad accedere ad aree situate tra le pieghe della corteccia.

Elettrodi flessibili, che si spostano con le lievi pressioni del cervello – causate da variazioni nella pressione sanguigna o dal normale ciclo respiratorio – permetteranno anche registrazioni più stabili. Gli elettrodi attuali richiedono di ricalibrare il decodificatore, perché da un giorno all'altro gli elettrodi rigidi cambiano posizione rispetto ai neuroni, e i ricercatori vorrebbero seguire l'attività degli stessi neuroni per settimane e mesi.

Gli impianti devono essere miniaturizzati, operare a bassa potenza (per evitare di surriscaldare il cervello) e funzionare *wireless*, per cui non saranno necessari cavi che collegano il dispositivo al tessuto cerebrale. Le tecnologie BMI attuali devono essere impiantate con una procedura chirurgica. Ma, come ci auguriamo, un giorno saranno sviluppate interfacce di registrazione e stimolazione capaci di svolgere le loro funzioni attraverso il cranio e con la stessa precisione delle attuali matrici impiantate chirurgicamente.

Le BMI sono pensate per assistere persone con paralisi. Eppure i romanzi e i film di fantascienza e i mezzi di comunicazione si sono concentrati sull'uso della BMI per il potenziamento, conferendo capacità «superumane» che potrebbero permettere a una persona di correre più veloce e di saltare più in alto. Ma il potenziamento sarà realizzato solo quando saranno sviluppate tecnologie non invasive capaci di rilevare con precisione le attività di singoli neuroni.

Vorrei infine trasmettere la soddisfazione nel fare ricerca di base e renderla disponibile ai pazienti. La scienza fondamentale è necessaria per il progresso della conoscenza e lo sviluppo di terapie mediche. La capacità di trasferire queste scoperte in un ambito clinico realizza l'impresa ultima della ricerca. Lo scienziato rimane con un innegabile senso di soddisfazione nel condividere la gioia dei pazienti quando riescono a muovere un braccio robotico per interagire, di nuovo, con il mondo fisico. ■

PER APPROFONDIRE

Reach and Grasp by People with Tetraplegia Using a Neurally Controlled Robotic Arm. Hochberg L.R. e altri, in «Nature», Vol. 485, pp. 372-375, 17 maggio 2012.

High-Performance Neuroprosthetic Control by an Individual with Tetraplegia. Collinger J.L. e altri, in «Lancet», Vol. 381, pp. 557-564, 16 febbraio 2013.

Decoding Motor Imagery from the Posterior Parietal Cortex of a Tetraplegic Human. Aflalo T. e altri, in «Science», Vol. 348, pp. 906-910, 22 maggio 2015.

Intracortical Microstimulation of Human Somatosensory Cortex. Flesher S.N. e altri, in «Science Translational Medicine», Vol. 8, 361ra141, 19 ottobre 2016.

Proprioceptive and Cutaneous Sensations in Humans Elicited by Intracortical Microstimulation. Salas M.A. e altri, in «eLife», Vol. 7, e32904, 10 aprile 2018.

Un incendio infuria vicino a Delta, in California, nel settembre 2018, favorito da caldo e siccità senza tregua.

Josh Edelson/Getty Images

CLIMA

L'amplificatore del meteo

Strane onde nella corrente a getto fanno presagire un futuro pieno di ondate di calore e alluvioni

di Michael E. Mann

IN BREVE

Quando l'andamento della corrente a getto forma anse profonde, può portare forti piogge estive oppure ondate di caldo. E se la corrente subisce addirittura uno stallo, il brutto tempo può continuare per vari giorni.

La matematica già usata nella meccanica quantistica spiega perché la risonanza in atmosfera è in grado di amplificare le anse, rendendo il brutto tempo ancora peggiore.

Fino al 2050 circa, gli aerosol immessi nell'aria dalle centrali a carbone rallenteranno la gravità crescente degli episodi, tuttavia quando le centrali installeranno degli *scrubber*, la loro intensità aumenterà di nuovo.

Michael E. Mann è professore di scienze dell'atmosfera e direttore dell'Earth System Science Center alla Pennsylvania State University. È autore o coautore di quattro libri, tra cui *Dire Predictions*, *The Hockey Stick and the Climate Wars*, *La terra brucia: perché negare il cambiamento climatico minaccia il nostro pianeta* (Hoepli, 2017) e *The Tantrum that Saved the World*.

Considerate i seguenti eventi meteo estremi: nel 2003 l'Europa ha subito la peggiore ondata di calore della sua storia, con oltre 30.000 morti. Nel 2010 gli incendi in Russia e le alluvioni in Pakistan hanno provocato una quantità di danni e vittime senza precedenti. Nel 2011 l'ondata di caldo e la siccità negli Stati Uniti hanno fatto perdere agli allevatori dell'Oklahoma un quarto dei capi di bestiame. Nel 2016 gli incendi in Alberta sono stati il disastro più costoso nella storia del Canada.

E l'estate 2018 ha seminato devastazione negli Stati Uniti: tutto il sud-ovest desertico è stato colpito da temperature sopra i 38 gradi per vari giorni consecutivi, mentre forti piogge e alluvioni hanno inondato gli Stati al centro della costa atlantica, e la California ha vissuto una sconvolgente stagione di incendi. Anche in Europa e Asia hanno infuriato ondate di caldo estremo, alluvioni e incendi.

È una coincidenza che gli eventi meteo estivi più devastanti si siano verificati negli ultimi decenni? I miei colleghi e io riteniamo di no. Questi avvenimenti avevano in comune una caratteristica: un andamento insolito della corrente a getto. Questa corrente è una stretta striscia di vento forte che soffia da ovest a est attorno all'emisfero settentrionale, in genere lungo la frontiera tra Stati Uniti e Canada, continuando attraverso Oceano Atlantico, Europa e Asia. A volte questa striscia è piuttosto dritta, ma può anche formare grosse anse, come una S poggiata su un lato. Di solito si piega verso nord dall'Oceano Pacifico al Canada occidentale, quindi si dirige verso sud attraversando il Midwest, poi sale verso la Nuova Scozia. In genere questa forma percorre gli Stati Uniti da ovest a est in alcuni giorni, portando aria calda a nord o fresca a sud, e generando aree di pioggia o neve, soprattutto vicino alle anse.

Negli eventi estremi che ho osservato la corrente a getto si è comportata in modo strano: le anse si sono spinte a nord e a sud fino a latitudini eccezionali e si sono fermate, senza avanzare verso est. Più grandi sono queste anse, più gravi diventano i fenomeni meteo vicino al picco settentrionale e alla saccatura meridionale. E quando arrivano a uno stallo – come hanno fatto sopra gli Stati Uniti nell'estate del 2018 – queste zone possono essere inondate dalla pioggia o arrostite dal Sole per giorni e giorni. E sono colpite da alluvioni, siccità, ondate di caldo e incendi senza precedenti.

Di recente i miei collaboratori e io abbiamo mostrato che questi andamenti ondulatori, fortemente curvi e con fasi di stallo, sono diventati più frequenti a causa del riscaldamento globale, favorendo fenomeni meteorologici estremi. Ma prevediamo che questa gravità crescente possa assestarsi per qualche decennio. Potrebbe sembrare una notizia stranamente buona: i periodi brutti continueranno, ma almeno non peggioreranno. Inoltre prevediamo che, a partire dal 2050 circa, gli eventi estremi cominceranno a diventare molto più gravi, soprattutto in estate. Aumenteranno le minacce a salute e sicurezza delle persone, si aggraveranno i danni provocati dalle tempeste e si rovineranno i raccolti, necessari per nutrire una popolazione in crescita.

Come lo sappiamo? Ce lo dicono la matematica delle onde e la meccanica quantistica. Proprio così: la matematica che caratterizza il comportamento degli elettroni su piccolissima scala ci aiuta a descrivere il comportamento della nostra atmosfera su scala globale. E indica che l'intensificarsi dei fenomeni meteo pericolosi, il *plateau* imminente e l'aumento successivo sono provocati da un curioso scambio tra le concentrazioni di gas serra dovute all'uso di combustibili fossili e l'inquinamento da zolfo provocato dalle ciminiere industriali. E quello scambio porta a chiedersi se ridurre le emissioni impedirà alla corrente a getto di seminare distruzione.

Brutto tempo con Rossby

La corrente a getto si forma dove l'aria superficiale calda proveniente dalle zone subtropicali di tutto il mondo si sposta verso nord, venendo in contatto con l'aria superficiale fredda in arrivo dalla regione polare, più o meno lungo la frontiera tra Stati Uniti e Canada. La corrente a getto soffia a un'altezza di circa 10 chilometri, lungo il confine tra la troposfera (il livello più basso dell'atmosfera, dove avvengono i fenomeni meteo) e la stratosfera (il livello successivo, dove volano gli aerei).

Maggiore è la differenza di temperatura quando l'aria subtropicale incontra quella polare, più forte è il vento della corrente a getto. In estate la differenza di temperatura è minore che in inverno, quindi la corrente è più debole. Quando si indebolisce è più probabile che descriva ampie anse nord-sud.

Ma perché le anse si formano proprio in certi punti? La corrente a getto è influenzata da grandi onde che si diffondono nell'atmosfera, prodotte naturalmente via via che la Terra gira in un fluido, in questo caso l'aria. Sono le cosiddette onde di Rossby: prendono il nome dal meteorologo svedese-americano Carl-Gustaf Rossby, che negli anni trenta fu il primo a spiegare la fisica dei movimenti atmosferici su vasta scala. Si manifestano anche in tutti gli oceani.

Nell'atmosfera le onde di Rossby si estendono per centinaia di chilometri e nell'emisfero settentrionale si spostano da ovest a est. Quando in estate la differenza di temperatura tra le masse d'aria

Forti alluvioni provocate da un effetto atmosferico detto amplificazione quasi risonante hanno sommerso la città di Khairpur Nathan Shah, in Pakistan, nel 2010.

Gideon Mendel/Getty Images

diminuisce, le onde di Rossby tendono a piegarsi di più e ad avanzare più lentamente da ovest a est sopra il Nord America. La corrente a getto segue forma e percorso di queste onde.

Ce ne sono anche altre, che percorrono atmosfera e oceano. Le onde di gravità, per esempio, derivano da una perturbazione temporanea tra la gravità che attira l'atmosfera verso il basso e le forze di galleggiamento che la spingono verso l'alto, come una corrente d'aria che passa sopra una catena montuosa. Le onde di Kelvin si manifestano nel Pacifico in un corridoio a cavallo dell'equatore. Qui viaggiano in modo prevedibile, da ovest a est, riscaldando e raffreddando periodicamente le acque superficiali, un aspetto cruciale del fenomeno climatico di El Niño/Oscillazione Meridionale.

Le anse nella corrente a getto creano sistemi meteo superficiali locali, che si muovono verso est via via che le anse procedono in quella direzione. Li vediamo nelle mappe meteo sotto forma di grandi H e L: sistemi di alta e bassa pressione. Un sistema di alta pressione nell'ansa settentrionale, o picco, gira in senso orario e in estate porta un tempo caldo e secco. Un sistema di bassa pressione nell'ansa meridionale, o saccatura, gira in senso antiorario, portando un tempo umido e fresco. Se la corrente a getto è abbastanza debole, l'onda di Rossby a forma di S che segue può restare sul posto in fase di stallo, senza procedere verso est: un andamento a «onde stazionarie». I sistemi di alta e bassa pressione girano sul posto, cuocendo la Terra al di sotto, oppure inondandola con nubifragi ininterrotti e alluvioni: ciò che è successo con gli uragani Harvey e Florence, rispettivamente in Texas e Stati Uniti centrorientali.

La risonanza peggiora la situazione

I fenomeni meteo estremi avvengono tendenzialmente quando le anse nelle onde di Rossby, e quindi la corrente a getto, sono fortemente amplificate. Più alti sono i picchi e più basse le saccature, più profondi sono i sistemi di alta e bassa pressione. In questo andamento a onde stazionarie il sistema di alta pressione ristagna (a volte si parla di *pattern* bloccante). Proprio quello che a luglio 2018 ha provocato l'ondata di caldo nel sud-ovest degli Stati Uniti, e al tempo stesso le alluvioni al centro della costa atlantica. Un altro esempio è stato il picco sulla Russia a luglio 2010, collegato a livelli record di caldo, siccità e incendi, e a valle del picco una profonda saccatura sul Pakistan, associata ad alluvioni senza precedenti.

L'ampiezza raggiungibile normalmente dalle onde di Rossby è limitata dall'energia che irradiano mentre curvano verso nord e sud via via che si dirigono a est. In determinate condizioni, però, l'atmosfera può comportarsi come una specie di guida d'onda. Immaginate una linea che si snodi da ovest a est nel Canada centrale e un'altra che attraversi gli Stati Uniti meridionali. Un'onda di Rossby curva resta all'interno di queste «pareti», perdendo poca energia. Questo isolamento rinchiude la corrente a getto curva e i forti sistemi di alta e bassa pressione.

Il cavo coassiale che va dall'emittente tv via cavo al vostro televisore è un esempio di guida d'onda. Le onde elettromagnetiche che trasmettono il segnale televisivo dall'emittente a voi sono sostanzialmente rinchiuse all'interno della parete cilindrica del cavo, e il segnale perde poca energia. Se vedete immagini nitide dovete ringraziare la fisica delle guide d'onda.

Quando le onde restano sul posto sotto forma di onde stazionarie, in determinate circostanze le anse possono aumentare rapidamente in ampiezza: in fisica questo fenomeno si chiama risonanza. Quando accade alle onde di Rossby, più frequenti in estate, prende il nome di amplificazione quasi risonante (QRA). Alcuni anni fa Vladimir Petoukhov e collaboratori al Potsdam Institute for Climate Impact Research, in Germania, hanno dimostrato che le condizioni alla base della QRA dipendono dalla forma della corrente a getto. In effetti il cambiamento climatico può influenzare la forma della corrente a getto, e quindi la QRA e la frequenza degli eventi meteo estremi durante l'estate.

Per capire come avviene questa confluenza dobbiamo avvalerci della matematica elaborata all'inizio del XX secolo per risolvere certi problemi di meccanica quantistica. È un collegamento che a me dà particolari soddisfazioni: prima di passare alle scienze dell'atmosfera ho cominciato la carriera in fisica teorica, quindi è rassicurante sapere che quei libri di testo sulla meccanica quantistica che ho tenuto per decenni sono ancora utili per il mio lavoro.

Meteo estremo bloccato sul posto

La corrente a getto influisce sul meteo in tutto l'emisfero settentrionale. Quando curva può creare forti centri di pressione, che portano ondate di caldo o forti piogge (*mappamondi*). Anse molto ampie possono restare bloccate sul posto, prolungando per molti giorni le condizioni estreme, soprattutto in estate. Stranamente, la fisica a scala planetaria somiglia a quella della meccanica quantistica a scala atomica (*box*).

Guida d'onda in cielo

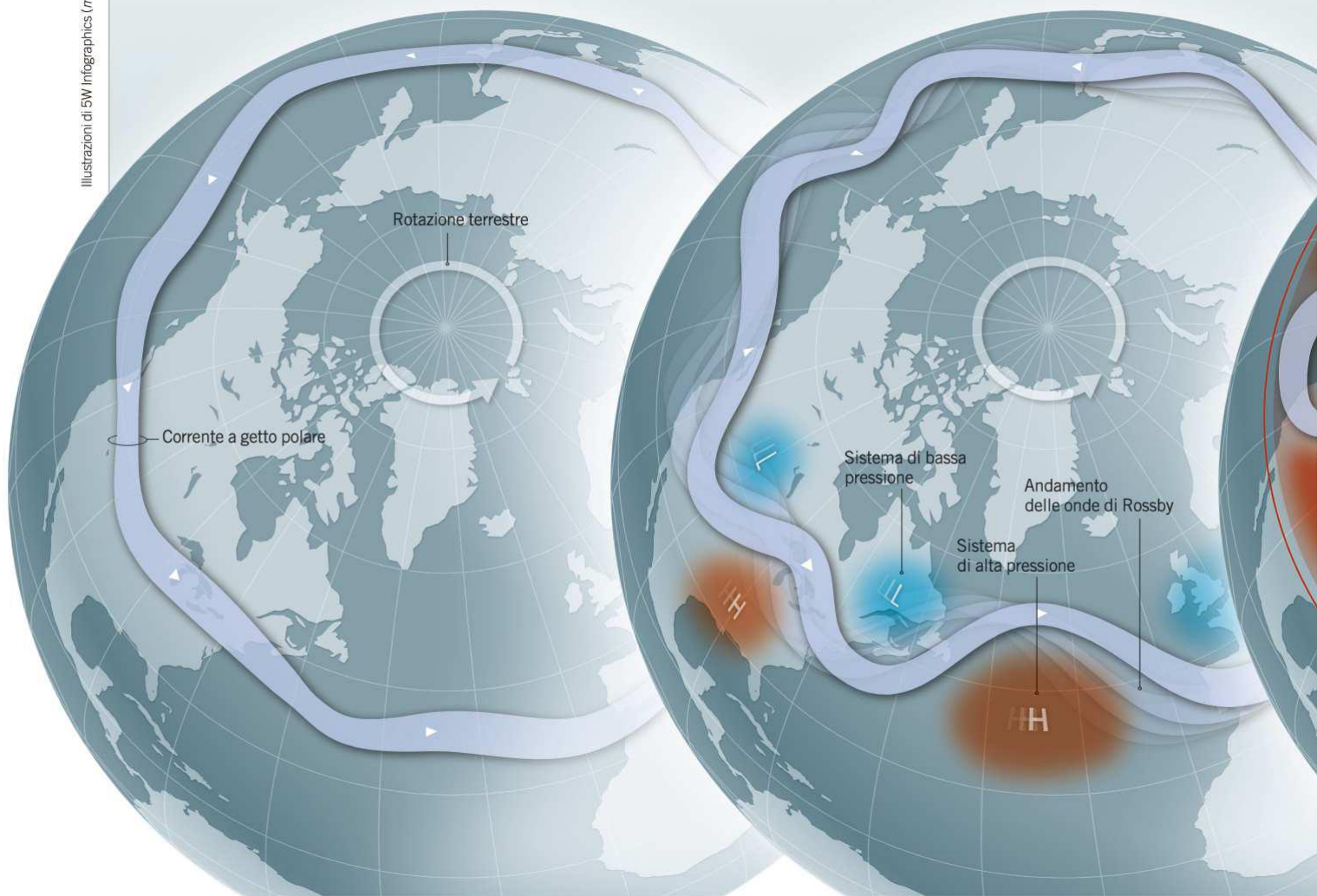
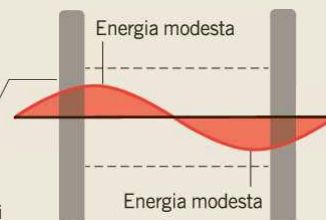
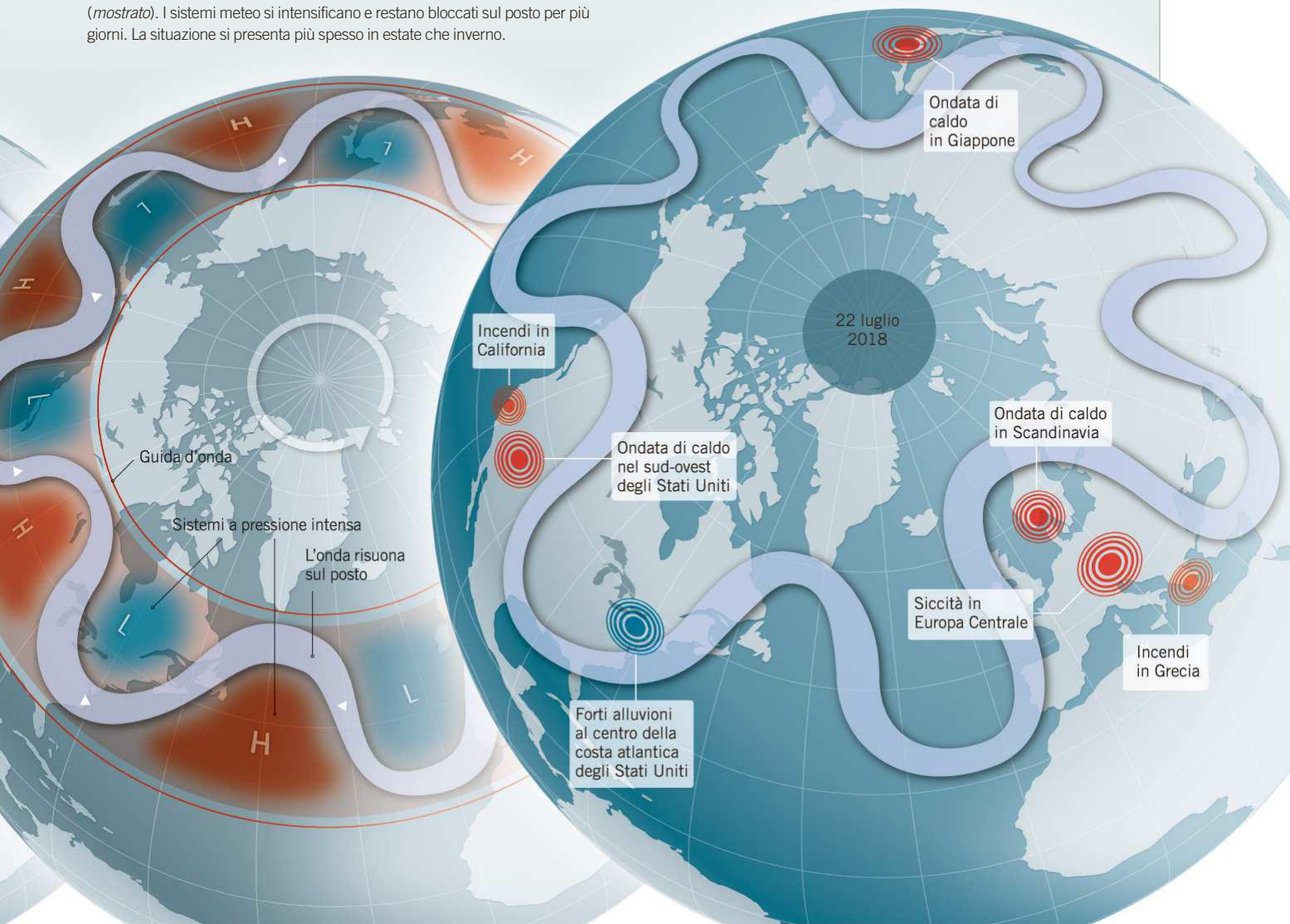
La guida d'onda atmosferica che intrappola sul posto le onde di Rossby è simile, sotto l'aspetto matematico, a una guida d'onda quantistica che intrappola un elettrone. In fisica classica, un elettrone all'interno di un contenitore con pareti infinitamente alte (che rappresenta una barriera ad alta energia) si comporta come una particella, rimbalzando avanti e indietro **A**. Se le pareti hanno un'energia modesta, un elettrone può sfuggire. Ma in fisica quantistica un elettrone si comporta come un'onda intrappolata in una guida; se questa è debole (energia modesta), la probabilità che l'elettrone si possa trovare fuori dalle sue pareti è concreta **B**. Se però la guida d'onda ha un'alta energia, la probabilità che l'elettrone attraversi le pareti come un tunnel è molto più bassa; analogamente, le onde di Rossby collegate a una corrente a getto con anse molto accentuate restano bloccate in una guida d'onda atmosferica, colpendo le regioni terrestri sottostanti con calore o pioggia persistenti.

La corrente a getto circonda la Terra

Le correnti a getto si formano a circa 30 e 60 gradi di latitudine, tra le principali celle di circolazione d'aria nell'atmosfera (*in alto*). Il getto polare, dell'emisfero settentrionale, gira intorno alla Terra da ovest a est, a volte quasi in linea retta, altre volte con leggere anse (*in basso*). I sistemi meteorologici tendono a seguire il percorso.

I centri di pressione crescono

In estate, anse pronunciate nella corrente a getto creano sistemi di bassa pressione (L, o B in mappe in italiano), che portano un tempo fresco e umido, e sistemi di alta pressione (H, o A) che provocano caldo e siccità. A volte la corrente a getto assume un andamento ripetitivo e ondulato (*mostrato*), che segue la forma delle onde di Rossby, create nell'atmosfera via via che la Terra ruota al suo interno. Le onde, come le condizioni meteo, vanno da ovest a est.

Illustrazioni di 5W Infographics (*mappamondi*) e Jen Christiansen (*guide d'onda*)

A Fisica classica
Le pareti infinitamente alte rappresentano una barriera ad alta energia
Gli elettroni sono particelle ad alta energia che non riescono a uscire
Elettrone
Le pareti finite rappresentano una barriera a energia modesta
Gli elettroni sono particelle a media energia che possono uscire
B Fisica quantistica
Le pareti infinite rappresentano una barriera ad alta energia che si comporta come una guida d'onda forte
Gli elettroni sono onde con una bassa probabilità di passare attraverso le pareti con l'effetto tunnel
Alta energia
0
Alta energia
Le pareti finite rappresentano una barriera a energia modesta che si comporta come una guida d'onda debole
Gli elettroni sono onde con un'alta probabilità di trovarsi fuori dalle pareti
Energia modesta
Energia modesta
Le tempeste risuonano
Le grandi onde di Rossby, come le anse della corrente a getto che le seguono, possono bloccarsi sul posto, formando un'onda stazionaria. Quindi l'atmosfera può comportarsi come una guida d'onda (linee rosse), e questo stimola le anse ad andare in risonanza e amplificarsi, spingendosi ancora più a nord e a sud (mostrato). I sistemi meteo si intensificano e restano bloccati sul posto per più giorni. La situazione si presenta più spesso in estate che inverno.
Giornata distruttiva
Una corrente a getto in risonanza, in fase di stallo tra fine luglio e inizio agosto del 2018, ha scatenato o intensificato fenomeni meteo estremi in tutto il mondo. Il 22 luglio ondate di calore e siccità hanno colpito varie regioni e aggravato gli incendi, mentre su altre aree si sono abbattute forti alluvioni.
H
L
H
L
H
L
H
Guida d'onda
Sistemi a pressione intensa
L'onda risuona sul posto
L
H
L
Ondata di caldo in Giappone
Incendi in California
22 luglio 2018
Ondata di caldo nel sud-ovest degli Stati Uniti
Ondata di caldo in Scandinavia
Siccità in Europa Centrale
Incendi in Grecia
Forti alluvioni al centro della costa atlantica degli Stati Uniti

La connessione quantistica

Capire come il comportamento di un'onda atmosferica sia simile sotto l'aspetto matematico a quello di un elettrone aiuta a rivelare un motivo fondamentale per cui siccità e alluvioni si stanno aggravando.

Nella fisica classica un elettrone può restare intrappolato quando è circondato da un'alta energia potenziale. Immaginate di guardare attraverso una scatola da un lato, con pareti infinitamente alte. L'elettrone non riesce ad attraversarle perché hanno un'energia infinitamente alta, che non si può superare. L'elettrone rimbalza avanti e indietro, a destra e a sinistra, in linea retta.

Nello scenario della meccanica quantistica le cose vanno diversamente. L'elettrone non ha più una posizione definita, invece si determina la probabilità di trovarlo con l'equazione di Schrödinger, un'equazione d'onda. Il movimento dell'elettrone – per essere più precisi, la sua posizione più probabile – è descritto da una curva sinusoidale: una S poggiata su un lato. Già sentito? L'elettrone si comporta parzialmente come una particella e parzialmente come un'onda.

Quando le «pareti» di energia potenziale non hanno un'altezza infinita, bensì finita, accade qualcosa di interessante. In questo caso l'elettrone ha una bassa probabilità di penetrare effettivamente nella parete e, se questa è abbastanza sottile, la può attraversare del tutto. È come se lanciaste contro un muro una pallina da tennis che lo attraversasse come un tunnel, fino a ritrovarsi dall'altra parte. La stessa probabilità si presenta con l'altra parete. L'elettrone è sostanzialmente rinchiuso nella scatola, con solo un po' di «perdita» ai margini. Benvenuti nel mondo della meccanica quantistica.

Guardare attraverso questa scatola finita è come guardare dentro una guida d'onda con una leggera perdita, come un cavo coassiale. La perla matematica che ci permette di risolvere le equazioni che descrivono questi oggetti risale al 1926 e prende il nome di approssimazione WKB, in omaggio ai tre scienziati che l'hanno scoperta: Gregor Wentzel, Hendrik Kramers e Léon Brillouin. L'approssimazione WKB si usa nella meccanica quantistica per moltissime equazioni d'onda e per contribuire alla progettazione di prodotti come il diodo tunnel del vostro *smartphone*.

Nei primi anni ottanta David Karoly, oggi alla Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, in Australia, e Brian Hoskins, dell'Università di Reading, nel Regno Unito, hanno dimostrato che l'atmosfera può comportarsi come una guida per le onde di Rossby in stallo, o stazionarie, che hanno determinate lunghezze d'onda corte (circa la larghezza degli Stati Uniti continentali, cioè da sei a otto lunghezze d'onda piene girando intorno all'emisfero settentrionale).

L'onda di Rossby stazionaria resta intrappolata dentro la guida d'onda, con solo una minima perdita di energia attraverso il limite settentrionale e quello meridionale, proprio come l'elettrone. In questa situazione le onde possono crescere in ampiezza a causa della QRA. Bloccata sul posto, l'ormai enorme onda stazionaria genera sistemi meteorologici estremi all'interno dei picchi e delle saccature, che durano per vari giorni. L'approssimazione WKB, che risolve i problemi della guida d'onda nella meccanica quantistica, aiuta a fare altrettanto con la guida dell'onda di Rossby.

Cambiamento di onde e clima

In base a queste conoscenze, ora possiamo vedere come il cambiamento climatico influisca sulle onde stazionarie che ci portano eventi meteo estremi e duraturi. Anni fa Petoukhov e collaboratori, a Potsdam, basandosi sul lavoro di Karoly e Hoskins, hanno dimostrato che per le onde di Rossby stazionarie le condizioni della guida d'onda si creano principalmente in estate. Spesso in questa stagione la corrente a getto non è un singolo vento forte, diretto da ovest a est, ma si alterna tra due corridoi, uno a nord e uno a sud della consueta posizione lungo la frontiera tra Stati Uniti e Canada.

1

Usando l'approssimazione WKB, Petoukhov ha dimostrato che è proprio in queste condizioni di corrente a getto «a due picchi» che l'atmosfera può comportarsi come una guida per le onde di Rossby con una lunghezza d'onda ridotta. In genere hanno un'ampiezza limitata: le anse non si spingono molto a nord o a sud. Ma se un'ansa iniziale si genera quando una massa d'aria in movimento da ovest a est colpisce le Montagne Rocciose o le Alpi, o quando incontra un forte contrasto di temperatura superficiale al confine tra terra e oceano, le onde di Rossby possono trasformarsi rapidamente in anse molto più grandi, tramite la QRA.

L'eventuale presenza di condizioni favorevoli alla QRA varia da un anno all'altro. Dipendono per lo più dall'andamento nord-sud delle variazioni di temperatura nella parte bassa dell'atmosfera, cosa che i modelli climatici riescono a risolvere bene. Nel 2017 i miei colleghi e io abbiamo dimostrato che da alcuni decenni c'è una tendenza più forte alle condizioni che favoriscono la QRA. Le simulazioni climatiche indicano che la tendenza è determinata dagli aumenti nel tempo delle concentrazioni di gas serra. Hanno avuto una certa influenza anche fattori naturali come le fluttuazioni della luce solare e le eruzioni vulcaniche, oltre ad altri fattori umani tra cui in particolare l'inquinamento atmosferico da anidride solforosa. Le simulazioni, dette CMIP5, risultano da modelli elaborati da oltre 50 gruppi in tutto il mondo per l'ultimo rapporto dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

I dati delle temperature rilevati nelle stazioni meteorologiche e i modelli indicano che il cambiamento climatico sta provocando nell'Artico un riscaldamento più veloce che nel resto dell'emisfero settentrionale: questa situazione prende il nome di amplificazione artica. Una minore differenza di temperatura tra le latitudini medie e quelle polari genera una corrente a getto più lenta a livello generale, fatto che favorisce condizioni meteo più persistenti ed è collegato alla corrente a getto a due picchi e alla QRA.

Questa tendenza crescente contribuisce a spiegare la sequela di eventi meteo estremi di lunga durata avvenuti nelle estati degli ultimi due decenni in tutto l'emisfero settentrionale. Di recente gli scienziati hanno dimostrato che le condizioni della QRA sono correlate all'ondata di caldo del 2003 in Europa, agli incendi in Russia nel 2010 e alle alluvioni in Pakistan collegate con loro, alla siccità che nel 2011 ha colpito l'Oklahoma e altre parti degli Stati Uniti, oltre che agli incendi del 2015 in California e del 2016 in Alberta,

Sean Gallup/Getty Images

2

Girasoli seccati (*1*) e semi striminziti (*2*) vicino a Golssen, in Germania, sono il risultato di una lunga ondata di caldo nel 2018.

in Canada. A questo elenco adesso possiamo aggiungere gli incendi senza precedenti del 2018 in California. Negli ultimi decenni il cambiamento climatico antropogenico ha aumentato la probabilità di questi eventi meteo estremi del 50 per cento circa.

Lo stallo

Sembra che gli eventi meteo estremi non possano che aggravarsi. E stando ad alcuni fattori di base andrà così. Per esempio, un'atmosfera più calda contiene più umidità, il che provoca più piogge e alluvioni. E un pianeta più caldo significa ondate di calore più frequenti, lunghe e intense. Ma che dire della corrente a getto a onde stazionarie e della QRA?

Come pare che abbia detto il grande fisico Niels Bohr, è difficile fare previsioni, «soprattutto sul futuro». In un articolo pubblicato a ottobre 2018 su «Science Advances», i miei colleghi e io abbiamo analizzato la probabile evoluzione degli eventi legati alla QRA in seguito al cambiamento climatico previsto per il futuro. Ci aspettavamo che la tendenza all'aumento continuasse ininterrottamente, ma abbiamo scoperto qualcosa di diverso.

L'IPCC e gli esperimenti CMIP5 valutano le condizioni future ipotizzando scenari diversi, che vanno da forti tagli immediati delle emissioni di anidride carbonica a un mondo che continua a emettere sempre più CO_2, proseguendo sulla strada intrapresa. Abbiamo scoperto che in quest'ultimo scenario immutato la tendenza verso le condizioni favorevoli alla QRA si assesta intorno al 2050. Poi accelera nella seconda metà di questo secolo.

Abbiamo scoperto che il motivo riguarda un altro fattore antropogenico del cambiamento climatico, importante ma a volte trascurato: le sostanze che inquinano l'atmosfera, come l'anidride solforosa, prodotte dalla combustione di carbone e altre attività industriali. Questi inquinanti formano aerosol che vagano in atmosfera e riflettono la luce solare nello spazio, raffreddando la Terra al di sotto.

L'inquinamento da aerosol è stato il responsabile della pioggia acida nel nord-est degli Stati Uniti dagli anni cinquanta ai settanta. Il Clean Air Act ha obbligato le industrie a installare nelle ciminiere gli *scrubber* per togliere l'anidride solforosa dalle emissioni. Questo ha contribuito a salvare foreste, laghi e fiumi, ma ha anche lasciato nell'atmosfera meno aerosol a riflettere la luce solare e contrastare il riscaldamento dovuto all'aumento di CO_2, un motivo per cui dagli anni settanta il riscaldamento globale ha accelerato.

Gran parte del resto del mondo – a partire dalla Cina, responsabile di quasi metà del consumo di carbone attuale – adotta ancora pratiche industriali antiquate. Lo scenario immutato dell'IPCC presuppone che i paesi come la Cina continueranno a bruciare carbone, contribuendo a maggiori emissioni di CO_2 che arriverebbero a oltre il triplo del livello preindustriale entro la fine del XXI secolo. Lo scenario però presuppone anche che nel corso dei prossimi decenni queste industrie installeranno gli scrubber.

Così si arriverà a una notevole riduzione degli aerosol tra oggi e la metà del secolo, oltre che a una netta crescita del riscaldamento. L'effetto si sentirà soprattutto alle latitudini medie in estate, con la massima quantità di luce solare, che in gran parte non sarà più riflessa. In alcuni modelli, alle medie latitudini risulta un riscaldamento estivo così forte da superare quello dell'Artico. L'amplificazione artica si riduce, o addirittura si ferma: significherebbe una QRA stabile o addirittura in calo, e non ci sarebbe un ulteriore peggioramento della corrente a getto ad aggravare i fenomeni meteo estremi in estate.

Il destino in mano nostra

Un futuro di questo tipo sembra un buon affare. Ma in realtà è un patto faustiano: il prezzo del sollievo a breve termine è un peggioramento a lungo termine. Entro la metà del secolo gran parte degli aerosol sono scomparsi: da quel momento in poi l'aumento dei gas serra continuerà a spingere in alto le temperature. Ancora una volta, l'aumento è più veloce nella regione polare. L'amplificazione artica riprende, e gli eventi legati alla QRA – i pattern meteo stazionari, intensi, caldi, secchi e umidi – ricominciano ad aumentare: entro la fine del secolo crescono del 50 per cento circa rispetto a oggi. Il cambiamento sarà più evidente in estate alle latitudini medie, fatto ancora più preoccupante perché si tratta proprio delle zone più popolate e – soprattutto in estate – ricche di coltivazioni, molte delle quali non resistono al calore forte.

C'è una via d'uscita? Se il mondo agisce subito per uscire rapidamente dal percorso immutato e ridurre nettamente le emissioni di carbonio, possiamo evitare un catastrofico riscaldamento di 2 gradi del pianeta, e molto probabilmente eviteremo un'ulteriore crescita degli eventi legati alla QRA. La strada più sicura (e conveniente) è ridurre subito l'uso di combustibili fossili e altre attività umane che aumentano la concentrazione di gas serra.

Vale la pena notare che il mondo deve decidere in uno stato di incertezza. Secondo alcune simulazioni, gli eventi legati alla QRA aumenteranno in misura molto maggiore (più del triplo), mentre altre addirittura prevedono che diminuiranno. Questo divario dipende per lo più dai diversi modi di considerare gli aerosol nei vari modelli climatici. Le previsioni finiranno per convergere? Non lo sappiamo ancora. Probabilmente, visti l'incertezza e l'enorme rischio potenziale se si dovesse concretizzare lo scenario peggiore, la strategia più saggia è una forte riduzione delle emissioni.

Ridurre le incertezze sarebbe utile. Questo obiettivo dipende in parte dal perfezionamento delle conoscenze di fisica degli aerosol e della loro dispersione della luce solare, cioè delle onde elettromagnetiche emanate dal Sole. Ancora una volta, bisogna capire la fisica del comportamento delle onde. Il cerchio si è chiuso. ■

PER APPROFONDIRE

Influence of Anthropogenic Climate Change on Planetary Wave Resonance and Extreme Weather Events. Mann M.E. e altri, in «Scientific Reports», Vol. 7, articolo n. 45242, 27 marzo 2017.

Projected Changes in Persistent Extreme Summer Weather Events: The Role of Quasi-Resonant Amplification. Mann M.E. e altri, in «Science Advances», Vol. 4, n. 10, articolo n. eaat3272, ottobre 2018.

Gli strani percorsi della corrente a getto. Masters J., in «Le Scienze» n. 558, febbraio 2015.

Gli altri animali che usano strumenti

Scavi di strumenti di pietra lasciati da primati non umani fanno luce sulle origini dell'innovazione tecnologica

di Michael Haslam

Macachi cinomolghi dalla coda lunga usano pietre come strumenti per aprire conchiglie di molluschi in Thailandia.

Michael Haslam è un ricercatore indipendente di Londra. Al centro del suo lavoro c'è l'evoluzione della tecnologia negli esseri umani e in altre specie.

La marea sta salendo rapidamente, ma alle scimmie non sembra importare. Ciondolano e bisticciano sugli scogli e sulle mangrovie un po' più in alto dalla riva, masticando piano un'ostrica o pulendosi reciprocamente il pelo. I più giovani giocano a tuffarsi da un ramo d'albero nell'acqua tiepida e limpida del mare. Come tutti, in questo tratto costiero di una zona rurale della Thailandia, vivono in sintonia con il ritmo giornaliero della marea.

Io però sono preoccupato dall'acqua che sale. È un mite dicembre 2013, sono accovacciato sulla spiaggia accanto a una buca quadrata tracciata con precisione. E mi allungo a raccogliere dal fondo un'altra palettata di sabbia umida. I lati della buca misurano appena mezzo metro, ma per scavarla ci sono volute ore da quando è scesa l'alta marea notturna. Basterebbe un movimento inconsulto per far crollare il tutto, quindi non posso lavorare frettolosamente.

È uno scavo archeologico, proprio come uno se lo immagina, con secchi, setacci, cordicelle, livelle, contenitori per campioni e fettucce graduate. Ma ciò che mi ha attirato sulla piccola isola di Piak Nam Yai nel Parco nazionale Laem Son non sono tipici resti archeologici. Non cerco monete, ceramica o i resti di un insediamento di una cultura umana dimenticata. Cerco le tracce perdute della cultura delle scimmie che si può vedere su questa spiaggia.

Sono un archeologo dei primati: uso i metodi tradizionali dell'archeologia per capire il comportamento passato di varie specie di primati. A dire il vero, l'immagine che mi viene in mente quando dico questa frase è quella del dottor Cornelius, lo scimpanzé del *Pianeta delle scimmie* (il primo, quello del 1968), e lo scandalo che suscita quando disseppellisce le prove che un tempo gli umani non erano bestioni muti. Per questo lo accusano di eresia; il film non lo dice, ma ho il forte sospetto che perda anche i fondi. Mi sento solidale con Cornelius perché in questi ultimi anni ho contribuito a impostare un nuovo campo di ricerca speculare al suo. Da più di 150 anni il termine «archeologia» indica lo studio scientifico dei resti fisici di un passato strettamente umano. In tutto questo tempo è emersa una moltitudine di specializzazioni su periodi, aree geografiche o metodi, che però avevano tutti un tema centrale: capire noi stessi. Gli altri animali rientravano negli studi archeologici, ma solo come cibo, mezzi di trasporto, animali da compagnia o parassiti. Orbitavano attorno al nostro mondo.

Tutto questo ha prodotto risultati straordinari. Nel 2015, per esempio, Sonia Harmand della Stony Brook University ha esteso la documentazione nota dei comportamenti umani fino a oltre 3 milioni di anni fa, scoprendo strumenti in pietra lasciati da qualche remoto antenato a Lomekwi, in Kenya. Che siano oggetti in pietra non è una coincidenza. Per la massima parte di questo archivio di milioni di anni, gli utensili in pietra sono i soli manufatti culturali sopravvissuti per guidare la nostra interpretazione delle origini: gli oggetti più deperibili si sono perduti nel tempo.

Spostando lo sguardo sui nostri parenti evolutivamente più prossimi, scimmie e grandi scimmie antropomorfe, l'archeologia dei primati punta a costruire un quadro più solido per capire la lunga storia dello sviluppo tecnologico umano. Anche gli esseri umani e i nostri antenati diretti sono primati, e far luce sul nostro cammino evolutivo è un obiettivo centrale di questa ricerca. Inquadrare il complesso sorgere della tecnologia umana nel suo più ampio contesto biologico ci darà una comprensione migliore sulle caratteristiche che derivano dalla nostra comune eredità di primati e su quelle che invece sono caratteristiche solo nostre.

Assenza di prove

Gran parte del motivo per cui gli archeologi si sono concentrati solo sul recupero della cultura materiale umana è che per molto tempo si è pensato che gli esseri umani fossero gli unici a usare e produrre strumenti. La primatologa Jane Goodall fu la prima a mostrare il contrario con i suoi studi sugli scimpanzé negli anni sessanta. L'antropologo Louis Leakey aveva scoperto una notevole varietà di fossili umani e strumenti in pietra in antichi ambienti su rive lacustri dell'Africa orientale, e voleva sapere in quale tipo di attività avrebbero potuto impegnarsi gli antenati degli esseri umani in quei luoghi. Così inviò Goodall in quello che è oggi il Parco nazionale di Gombe Stream, in Tanzania, sulle rive del Lago Tanganica, per vedere come si comportavano gli scimpanzé della zona. Sebbene le scoperte finali di Goodall avessero poco a che fare con il lago, le sue osservazioni di scimpanzé che fabbricavano e usavano strumenti per procurarsi il cibo cambiarono la nostra percezione delle capacità dei primati. Gli scimpanzé di Gombe,

IN BREVE

Tradizionalmente gli archeologi si sono concentrati solo sul recupero della cultura materiale appartenente ai membri della famiglia umana.

Ma anche alcuni primati non umani, come pure altre specie, usano strumenti.

Da qualche anno alcuni ricercatori hanno iniziato a dissotterrare la documentazione archeologica degli altri animali.

Queste indagini potranno chiarire i fattori che hanno governato l'emergere della tecnologia umana e di quella non umana.

però (*Pan troglodytes schweinfurthii*), usano solo strumenti ricavati da piante, che nel clima tropicale durano giusto qualche settimana. La discrepanza tra la sopravvivenza degli attrezzi di pietra vecchi di milioni di anni trovati in abbondanza da Leakey e quella degli strumenti – bastoni ed erba – trovati da Goodall era netta.

Per fortuna gli scimpanzé sono inventivi, e negli anni settanta sono stati scoperti molti gruppi della sottospecie occidentale (*Pan troglodytes verus*) che usano strumenti di pietra per spaccare le noci della foresta. Prove genetiche fanno pensare che questa sottospecie si sia separata dalla popolazione principale centro-africana degli scimpanzé forse 500.000 anni fa. Dato che gli scimpanzé dell'Africa centrale e orientale (come si vede a Gombe) non usano strumenti di pietra – e neanche la specie sorella, i bonobo (*Pan paniscus*) – sembra probabile che la popolazione occidentale abbia inventato indipendentemente l'uso della pietra solo più tardi.

La scoperta ha sollecitato domande chiave sull'origine degli strumenti litici. Il nostro antenato comune usava probabilmente strumenti vegetali, proprio come fanno scimpanzé e bonobo, e orangutan e gorilla. Ma perché solo qualche raro ramo della famiglia ha guardato alla pietra come materia prima? E ancora, gli scimpanzé usano la pietra solo per una gamma limitata di scopi, soprattutto per il vantaggio meccanico dato dalla durezza dei sassi quando devono rompere le noci più resistenti. Gli esseri umani, invece, hanno usato la pietra per sviluppare di tutto, dagli strumenti da taglio alle punte di freccia, dai gioielli alle piramidi in Egitto o in America centrale. Perché le traiettorie tecnologiche di scimpanzé ed esseri umani sembrano così differenti?

Siamo arrivati alla fine dell'archeologia antropocentrica: ormai l'archeologia deve guardare a tutto l'arco dei comportamenti del passato

Con due soli esempi di tecnologia della pietra sviluppati indipendentemente da esseri umani e scimpanzé, è difficile chiarire i passi tramite cui può essere emersa. Non possiamo prendere quello che fa un sottoinsieme degli scimpanzé e proiettarlo sui nostri primi antenati, sostenendo che la tecnologia umana sia nata dall'attività di spaccare le noci con i sassi. E sarebbe poco sensato anche prendere quello che fa un sottoinsieme degli esseri umani moderni e proiettarlo sugli antenati degli scimpanzé.

Uno dei problemi è che non abbiamo documentazione dell'evoluzione degli scimpanzé. Sempre più prove ottenute dal DNA indicano che esseri umani e scimpanzé iniziarono a divergere da un antenato comune circa 7 milioni di anni fa. Ma gli unici fossili noti di scimpanzé sono tre denti datati a circa 500.000 anni fa. E i più antichi strumenti noti di scimpanzé hanno poco più di 4000 anni. Come risultato, le conoscenze sulle nostre cugine grandi scimmie sono bloccate in un eterno presente, e il modo in cui le vediamo deriva quasi per intero dagli ultimi decenni. Se dovessimo valutare gli esseri umani su un arco di tempo così breve, capiremmo poco di come sono emerse e cambiate le nostre tecnologie lungo l'evoluzione. Se dovessimo tirare a indovinare, penseremmo che gli strumenti ancestrali con cui mangiavano gli esseri umani somigliavano più a bacchette o a posate? E qual è il tipo più primitivo di giocattolo umano, la Playstation o l'Xbox? Possono sembrare domande assurde, ma spesso gli scienziati non considerano se gli scimpanzé del passato si comportassero o meno come quelli osservati oggi. Erano più o meno abili dal punto di vista tecnologico?

Un'altra preoccupazione è che un confronto bidirezionale offre pochi indizi sul perché certi caratteri si siano sviluppati in una linea di discendenza ma non nell'altra. Per esempio, nell'Ottocento il naturalista britannico John Lubbock (che coniò i termini «Paleolitico» e «Neolitico» per due capitoli dell'Età della pietra) suggerì che il modo in cui i primati aprono le noci può essere un semplice precursore dell'umana tendenza a battere pietre tra loro per ottenere schegge affilate per tagliare. Se è così, perché gli scimpanzé oggi non scheggiano le pietre? L'assenza di questo comportamento emerge da mancanza di immaginazione, di tempo o di opportunità? Idealmente vorremmo avere una scelta più ampia di casi di studio su cui verificare le nostre ipotesi sullo sviluppo della tecnologia. Ed è qui che le scimmie che studio salvano la situazione.

Giocando con i sassi

Torniamo alla spiaggia in Thailandia. Il fondo della buca si sta riempiendo d'acqua. Trasuda dai lati e minaccia di erodere e destabilizzare ancora di più le pareti. Ho collegato una pompa con una batteria da automobile per non far salire troppo il livello dell'acqua, ma sto perdendo la battaglia. Alla fine, con i piedi lambiti dalle onde, tiro su una serie di piccole rocce vulcaniche, tutte con graffi e incavi caratteristici sulla superficie scabra.

Grazie al lavoro effettuato negli ultimi dieci anni dai primatologi Suchinda Malaivijitnond, della Chulalongkorn University, in Thailandia, e Michael Gumert, della Nanyang Technological University di Singapore, sappiamo che i macachi selvatici *Macaca fascicularis aurea* di Piak Nam Kai e altre isole della costa del Mare delle Andamane usano regolarmente pietre come strumenti. Il comportamento si estende a nord della Thailandia fino a Myanmar, dove fu descritto per la prima volta nel XIX secolo da un capitano di marina britannico, Alfred Carpenter. Ma sembra che il suo resoconto sia passato inosservato: l'uso di strumenti da parte dei macachi è stato riscoperto solo nel 2005, durante indagini sugli effetti del devastante tsunami che ha colpito l'Oceano Indiano nel 2004.

L'uso delle pietre da parte dei macachi sembra essere consolidato, vista la somiglianza delle osservazioni del XIX e XX secolo. Scesa la marea, le scimmie vengono giù dalle foreste all'interno dell'isola. Scelgono pietre grandi circa quanto una mano fra tutte quelle in riva al mare e le usano per percuotere e rimuovere la parte superiore del guscio delle ostriche attaccate alle rocce esposte. In genere le scimmie hanno bisogno solo di cinque o sei colpi per aprire un'ostrica; portano con sé lo strumento e lo usano più volte. In casi estremi, il mio gruppo le viste usare una pietra come martello per aprire e mangiare oltre 60 ostriche di fila.

Le ostriche non sono l'unico cibo per cui i macachi hanno bisogno di un utensile. Le zone intertidali come queste sono ricche di vita animale. I macachi preferiscono le ostriche, ma cercano anche lumache di mare e granchi, che però cercano di fuggire; le scimmie quindi le raccolgono e le mettono su una roccia piatta nelle vicinanze. Poi cercano una pietra assai più grossa di quelle usate per le ostriche – a volte pesano diversi chilogrammi – e la usano per schiacciare il cibo sulla roccia piatta, che fa da incudine. Quando un gruppo banchetta, tutta l'aria riecheggia del rumore delle pietre che colpiscono e fracassano i gusci.

Il risultato di queste incursioni nella zona di bassa marea è che la costa è cosparsa di conchiglie rotte e rocce segnate dai colpi. Le scimmie scelgono gli strumenti con abilità e perseveranza, usando le estremità appuntite di pietre più piccole per colpi di precisione contro le ostriche e l'ampia area centrale di massi più grossi per

schiacciare i gusci delle lumache. Questi due schemi di comportamento lasciano tracce prevedibili sugli strumenti, e con i miei colleghi abbiamo dimostrato che si può determinare come uno strumento è stato usato da un macaco a grazie ai segni di usura, che sono distinguibili dai segni dovuti a processi naturali. Questi danni caratteristici sono quelli che cerco scavando nelle morbide sabbie della spiaggia. Le piccole pietre vulcaniche che ho salvato dalle acque hanno segni del loro uso sulle ostriche. Anche se non ci permettono di far risalire a tempi più remoti l'uso di attrezzi da parte dei macachi – i più vecchi hanno 65 anni – sono comunque i primi strumenti di scimmia recuperati da uno scavo archeologico.

Cebi e anacardi

Questi macachi non sono le uniche scimmie ad aver lasciato una documentazione archeologica. Saltiamo a fine 2014: di nuovo sono accanto a una buca quadrata, ma stavolta senza brezza marina ad alleviare il caldo. Attorno ho la macchia semiarida e gli altopiani di arenaria del Parco nazionale della Serra da Capivara, nel nord-est del Brasile. Studenti dell'università della vicina São Raimundo Nonato scavano, i primatologi Tiago Falótico e Lydia Luncz, allora miei ricercatori postdoc, registrano le scoperte. Per fortuna non ci sono maree che ci intralciano; solo qualche ragno o scorpione che si inquieta se spostiamo la sua lettiera di foglie.

Siamo qui perché i cebi barbuti selvatici (*Sapajus libidinosus*) del parco si sono rivelati provetti tecnologi. Nel 2004 Dorothy Fragaszy, dell'Università della Georgia, ed Elisabetta Visalberghi, dell'Istituto di scienze e tecnologie della cognizione del Consiglio nazionale delle ricerche, hanno osservato l'uso di attrezzi litici da parte di cebi selvatici in un habitat simile a poco più di 300 chilometri di distanza. Oggi sappiamo che i cebi di un'ampia gamma di siti nell'interno del Brasile usano pietre pesanti per rompere i solidi gusci di noci e frutti del posto, in un modo che superficialmente richiama il comportamento degli scimpanzé occidentali. Ma i cebi di Serra da Capivara usano i loro strumenti in modo creativo. Oltre che per aprire noci e frutti, usano pietre anche per rompere zolle, scavare e cercare ragni sottoterra e radici. In parallelo con le cugine grandi scimmie antropomorfe, questi cebi staccano rametti scelti con cura, li sfrondano e con i denti li riducono alla misura giusta per usarli come sonde per dare la caccia a prede difficili da raggiungere, come le lucertole che si nascondono nelle fessure.

Per gli scavi, ci interessava una specifica fonte di cibo. L'anacardio è un albero indigeno di questa zona del Brasile, anche se oggi è coltivato in tutto il mondo. La sua noce è nutriente e gustosa, ma nel guscio degli anacardi freschi c'è un liquido caustico che provoca ustioni sulla pelle. Dunque i cebi usano pesanti pietre come martelli per arrivare alla noce. Il sistema funziona e lascia segni di impatto e tracce scure del liquido dell'anacardio su tutto lo strumento. Osservando e mappando le pietre dei cebi accumulatesi in parecchi anni, abbiamo individuato le zone della foresta che le scimmie sfruttano di più. E dato che condizioni di suolo, umidità e ombreggiatura adatte alla crescita dell'anacardio non sono cambiati significativamente nelle ultime migliaia di anni, abbiamo pensato che nei siti più trafficati di oggi probabilmente in passato c'è stata parecchia attività dei cebi; gli scavi ci hanno dato ragione. Abbiamo trovato almeno quattro distinte fasi di uso di strumenti da parte di scimmie nel passato, che si riflettono in gruppi di incudini e martelli di pietra con danni da usura. A conferma della conclusione che gli attrezzi erano stati usati dai cebi, non abbiamo trovato segni di attività umana, come fuochi, ceramiche o strumenti litici di tipi noti per essere di origine umana.

Lo strato più antico con strumenti dei cebi ha un'età compresa tra 2400 e 3000 anni: si tratta dunque dei più antichi artefatti non umani noti trovati fuori dall'Africa, e registrano il comportamento di scimmie vissute assai prima dell'invasione europea dell'America. Non abbiamo trovato prove dell'uso in tempi remoti di strumenti in materiale vegetale, ma come per gli esseri umani e le altre grandi scimmie questa assenza riflette probabilmente la maggiore deperibilità del legno rispetto alle pietre.

Trovare gli attrezzi di un'altra specie di scimmie con scavi archeologici sarebbe stata già un'ottima ricompensa per i nostri sforzi, ma i cebi della Serra da Capivara ci hanno riservato una sorpresa. Nella stessa stagione di lavoro sul campo ho filmato scimmie che spaccavano percussori di pietra contro altre rocce incorporate in un grosso blocco di conglomerato. Sembravano voler ottenere polvere di quarzo, che poi leccavano o aspiravano. Altri ricercatori avevano già osservato questo comportamento, ma quando ho raccolto i frantumi della pietra e poi ho scavato attorno al conglomerato, ho notato una cosa mai riferita: le schegge di roccia dei cebi somigliavano alle schegge trovate in alcuni siti dei primi antenati degli esseri umani. Dettagliate analisi delle pietre effettuate da un altro mio postdoc di allora, Tomos Proffitt, all'Università di Oxford, hanno provato che avevamo trovato il primo esempio di primate non umano che rompe deliberatamente pietre lasciandosi dietro schegge dai bordi taglienti.

Per essere chiari, finora non sono stati osservati cebi che usano le schegge affilate così prodotte. Allo stato brado questo resta un comportamento esclusivamente umano, per ora. Ma se la ripetuta scheggiatura di percussori di pietra può essere un involontario sottoprodotto di un'attività finora neanche immaginata – la produzione di polvere da ingerire – questa scoperta solleva domande su parti della documentazione archeologica dei primi umani. La tendenza degli archeologi è stata assumere che i primi umani rompessero deliberatamente le pietre per produrre schegge taglienti da usare per scopi specifici, come tagliare la carne. Ma, dato quello che vediamo nei cebi, dobbiamo chiederci se 3 milioni di anni fa i nostri antenati non potessero essere altrettanto indifferenti alle pietre taglienti che producevano. È possibile che abbiano prodotto schegge in modo accidentale per un tempo considerevole, prima di arrivare all'idea di raccoglierle e tagliarci qualcosa? Non possiamo saperlo, ma adesso dobbiamo almeno considerare questa possibilità. Certo è che il cammino verso l'adozione di un'innovazione come gli strumenti da taglio con i bordi taglienti, che da pericolosi rifiuti diventavano un'apprezzata risorsa, sarebbe stato più agevole se fosse già esistito un modo noto e affidabile per produrli.

Oltre i primati

Quali che siano le lezioni per la nostra evoluzione tecnologica, le scoperte in Brasile e Thailandia significano che abbiamo una documentazione archeologica su tre linee di discendenza (lignaggi) di primati non umani. Appena dieci anni fa scoprivamo l'esistenza di scimmie che usano strumenti di pietra. Adesso abbiamo fatto i primi passi nel seguire le tracce di questo comportamento nel tempo profondo. Oggi la linea umana forma solo una quarta parte degli archivi archeologici noti dei primati, sebbene sia di gran lunga la porzione più studiata.

In un recente lavoro, con i miei colleghi abbiamo suggerito che siamo arrivati alla fine dell'archeologia antropocentrica: ormai l'archeologia proseguirà tenendo d'occhio l'intero arco dei comportamenti passati. Qualche scienziato potrebbe non essere d'accordo quando sostengo che l'archeologia è solo un metodo ap-

Un cebo barbuto in Brasile usa una pietra come strumento per aprire un anacardo (*1*). Pietre con segni e macchie caratteristici, trovati sugli strumenti usati oggi dai cebi, sono state scoperte in siti archeologici datati anche a 2400-3000 anni fa (*2*).

Michael Haslam (*1*, *2*)

plicabile a ogni animale che lasci una documentazione materiale duratura del suo comportamento, non una cosa riservata al nostro lignaggio. Ma il lavoro di un piccolo gruppo di archeologi dei primati ha mostrato di poter inaugurare nuovi modi di guardare sia al nostro percorso evolutivo sia a quello di altre specie. La tecnologia – l'integrazione, basata su abilità e apprendimento, della cultura materiale nella nostra vita – non è una bizzarria solo umana. Per evolvere non richiede linguaggio né forme di insegnamento e cooperazione nello stile degli esseri umani, ma neppure un grande cervello: cebi e macachi adulti hanno cervelli di dimensioni pari al 5 per cento di un cervello umano adulto.

L'uso di strumenti in pietra, inoltre, è emerso indipendentemente almeno quattro volte nell'evoluzione relativamente recente dei primati; in ambienti costieri marini (macachi), lacustri (umani), forestali (scimpanzé) e semiaridi (cebi). Questa diversità significa che possiamo ragionevolmente attenderci che lo stesso comportamento sia emerso più volte nel passato in molti *taxa* di primati, anche se oggi non lo esibiscono più o si sono estinti. La cosa entusiasmante è che se questo scenario è vero gli strumenti litici usati da questi taxa sono ancora lì che attendono di essere scoperti.

Non c'è ragione di fermarsi ai primati. Negli ultimi anni ho iniziato un lavoro archeologico sulle lontre marine che usano strumenti di pietra sulla costa occidentale degli Stati Uniti, insieme all'etologa Natalie Uomini, del Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte di Jena, in Germania, e colleghi del Monterey Bay Aquarium e dell'Università della California a Santa Cruz. Abbiamo appreso, per esempio, che le lontre di mare tornano più volte in siti specifici lungo la riva per rompere i gusci dei molluschi, lasciandosi dietro pietre danneggiate e grandi mucchi di conchiglie rotte che potrebbero essere presi per cumuli di rifiuti preistorici umani. Il ciclo di retroazione tra questi marcatori duraturi del paesaggio e l'attrazione che esercitano sugli animali giovani che imparano a usare gli strumenti potrebbe essere un elemento critico delle tradizioni tecnologiche delle lontre marine, analogamente al ciclo tra i più desiderabili alberi di anacardio e i cebi barbuti.

Uomini e io abbiamo lavorato anche all'archeologia dei corvi della Nuova Caledonia, famosi per il raffinato modo in cui usano strumenti e per le loro abilità cognitive. Questi uccelli sfruttano regolarmente siti specifici del territorio; se si aggiungono strumenti in materiale duraturo ci sono tutti gli ingredienti necessari per la formazione e la sopravvivenza di siti archeologici che ci permettano di ricostruire comportamenti animali passati. L'archeologia è intrinsecamente una scienza interdisciplinare, e l'aggiunta dell'antico uso animale di strumenti ai suoi obiettivi di ricerca è stato un passaggio soddisfacente e addirittura intuitivo.

Per caso, la recente ascesa dell'archeologia dei primati ha coinciso con l'uscita di una nuova serie di film del *Pianeta delle scimmie*. In essi le grandi scimmie nostre parenti sviluppano tecnologie rozze ma che comunque superano rapidamente quelle a noi note degli animali selvatici del mondo reale. Anche una semplice lancia composita, con una punta tagliente collegata a un'asta separata, richiede un salto cognitivo che negli strumenti delle grandi scimmie attuali non sembra verificarsi. In quei film, l'uso controllato del fuoco e l'indossare ornamenti sono attributi altrettanto straordinari delle grandi scimmie: non ci sono casi noti di questi comportamenti nella vita reale fuori del lignaggio umano.

Ma le scimmie tecnologiche che vediamo sullo schermo non sembrano del tutto incredibili. Anzi, sono plausibili. Gli scimpanzé occidentali foggiano semplici lance, in un unico pezzo, da usare contro primati più piccoli, come fanno i cebi con le lucertole. William Mc Grew, dell'Università di St. Andrews, nel Regno Unito, il più esperto osservatore dell'uso di attrezzi da parte degli scimpanzé, fra i primi sostenitori dell'archeologia dei primati, ha riferito di uno scimpanzé orientale che portava una «collana» fatta di pelle di scimmia annodata. Che altro potrebbe succedere quando non ci sono esseri umani con taccuini a seguire questi animali?

L'archeologia umana è emersa come affidabile strumento di comprensione del nostro sviluppo e della nostra diversità, come risultato dell'impegno di migliaia di scienziati e con una spesa di miliardi di dollari per più di un secolo. Come ricompensa abbiamo milioni di anni di cultura materiale da usare quale impalcatura su cui poggiare ipotesi e scenari evolutivi. Siamo solo all'inizio della costruzione di una struttura analoga per altri animali. Chi può dire che troveremo? È il momento di scavare altre buche quadrate. ■

PER APPROFONDIRE

Archaeological Excavation of Wild Macaque Stone Tools. Haslam M. e altri, in «Journal of Human Evolution», Vol. 96, pp. 134-138, luglio 2016.

Pre-Columbian Monkey Tools. Haslam M. e altri, in «Current Biology», Vol. 26, n. 13, pp. R521-R522, luglio 2016.

Wild Monkeys Flake Stone Tools. Proffitt T. e altri, in «Nature», Vol. 539, pp. 85-88, novembre 2016.

Nuove origini per la tecnologia. Wong K., in «Le Scienze» n. 587, luglio 2017.

Perché crediamo alle TEORIE DEL

di Melinda Wenner Moyer

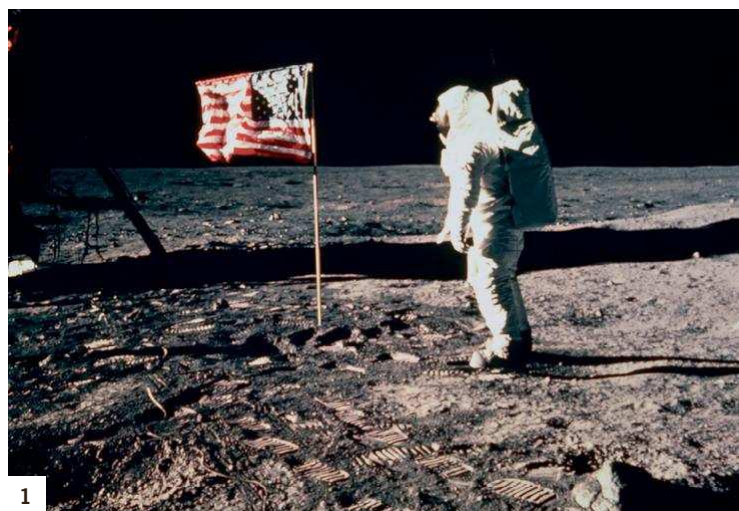
COMPLOTTO

PSICOLOGIA

Teorie senza fondamento minacciano sicurezza e democrazia. Ora alcuni studi indicano che questo genere di pensiero è favorito da emozioni specifiche

Illustrazione di Eddie Guy

Melinda Wenner Moyer è redattrice di «Scientific American». Nel numero di luglio 2018 ha scritto un articolo sulla nuova diffusione epidemica negli Stati Uniti di malattie che erano considerate in declino.

I complottisti credono che dietro molte situazioni si nascondano cospirazioni segrete. Per esempio negli Stati Uniti alcuni ritengono che l'allunaggio dell'Apollo sia stato un falso (*1*), altri che la Casa Bianca abbia costretto il giudice della Corte Suprema Anthony Kennedy a ritirarsi dalla carica (*2*) e altri ancora che il furgoncino di un attentatore sia stato ricoperto di slogan a favore di Trump per far ricadere la colpa sui Repubblicani (*3*). L'uomo che ha sparato e ucciso 11 persone in una sinagoga nel 2018 sosteneva che un gruppo ebraico volesse danneggiare gli Stati Uniti (*4*).

1

tephan Lewandowsky non voleva proprio crederci. Circa sei anni fa questo scienziato cognitivo, che all'epoca lavorava alla University of Western Australia, si era gettato a capofitto nello studio dei motivi per cui alcune persone rifiutano di accettare le prove schiaccianti del fatto che il pianeta si sta riscaldando e che la responsabilità è degli esseri umani.

Via via che si immergeva in questo negazionismo climatico, iniziò a scoprire che molti di quelli che ne erano convinti credevano anche ad altre storie assurde, per esempio che l'allunaggio dell'Apollo fosse una bufala montata ad arte dal governo statunitense. «Molti dei discorsi fatti da queste persone su Internet erano complottisti da cima a fondo», ricorda.

Le scoperte di Lewandowsky, pubblicate nel 2013 su «Psychological Science», fecero uscire allo scoperto i complottisti. Offesi dalle sue affermazioni, iniziarono a criticare la sua integrità on line e ne chiesero a gran voce il licenziamento, che non avvenne, anche se nel frattempo il ricercatore si è trasferito all'Università di Bristol, nel Regno Unito. Ma leggendo uno dopo l'altro i loro *post* arrabbiati Lewandowsky scoprì che, per tutta risposta a quello che lui affermava sulle loro tendenze complottiste, i suoi critici stavano diffondendo nuove teorie del complotto su di lui. Quelle persone accusavano lui e i suoi colleghi di falsificare le risposte ai sondaggi e di portare avanti la ricerca senza l'approvazione di comitati etici. Quando il suo sito web personale andò in crash, un blogger lo accusò di impedirne intenzionalmente l'accesso a chi lo criticava. Nulla di tutto questo era vero.

All'inizio l'ironia della cosa era divertente, ma tra le invettive ci fu persino una minaccia di morte, e le telefonate e le e-mail inviate all'università divennero così aggressive che il personale amministrativo che doveva rispondere chiese aiuto ai propri manager. Fu a quel punto che Lewandowsky cambiò idea sulla situazione. «Mi resi conto in fretta che quei tipi non avevano niente di divertente», racconta.

Le conseguenze pericolose della prospettiva complottista (l'idea che certe persone o gruppi di persone cospirino in modi segreti per ottenere un certo risultato) sono diventate dolorosamente chiare. L'uomo che ha sparato in una sinagoga di Pittsburgh, negli Stati Uniti, nell'ottobre 2018, uccidendo 11 persone e ferendone

IN BREVE

Le false teorie del complotto possono spingere le persone alla violenza, come è successo nel caso della sparatoria in una sinagoga di Pittsburgh, negli Stati Uniti, e influire sull'attività politica.

È stato dimostrato per via sperimentale che le persone ansiose sono particolarmente attratte dal pensiero complottista, e che questa mentalità è favorita anche da una perdita di controllo.

Secondo gli psicologi esistono segni caratteristici tipici delle teorie false, come contraddizioni interne nelle «prove» e affermazioni che si basano su premesse traballanti.

altre sei, ha giustificato l'attacco sostenendo che gli ebrei stessero favorendo di nascosto l'immigrazione illegale. Nel 2016 una teoria del complotto per cui alcuni membri di spicco del Partito Democratico statunitense sarebbero stati coinvolti in un giro di pedofilia che vedeva la partecipazione di diversi ristoranti nella zona di Washington spinse un uomo che ci credeva a sparare con un fucile d'assalto in una pizzeria; per fortuna non ci furono feriti.

Questo tipo di mentalità è molto più comune di quanto si immagini, anche se per fortuna non porta spesso a sparatorie. Più di un quarto della popolazione statunitense crede che ci siano complotti «dietro molte cose nel mondo», secondo un'analisi effettuata nel 2017 da ricercatori dell'Università di Oxford e dell'Università di Liverpool sui dati di un sondaggio governativo. Forse la diffusione delle teorie del complotto non è nuova, ma oggi queste teorie stanno diventando più visibili, sostiene Viren Swami, uno psicologo sociale all'Anglia Ruskin University, nel Regno Unito, che studia il fenomeno. Per esempio, quando nell'ottobre 2018 oltre

può offrire conforto, perché offre un comodo capro espiatorio e fa sembrare il mondo più semplice e controllabile. «Queste persone riescono a credere che se non ci fossero i cattivi, allora andrebbe tutto bene», spiega Lewandowsky. «Invece chi non crede nelle teorie del complotto deve ammettere semplicemente che le cose brutte avvengono per via del caso».

Però distinguere la realtà dalla fantasia può essere difficile, e a volte quelle che sembrano assurde teorie del complotto si rivelano vere. L'idea che i russi avessero messo lo zampino nelle elezioni presidenziali statunitensi del 2016, un tempo considerata ridicola, oggi è sostenuta da una serie di ammissioni di colpevolezza, comprovati atti d'accusa e rapporti dei servizi segreti degli Stati Uniti. Allora come si fa a sapere a che cosa credere? Gli psicologi stanno lavorando anche in questo senso e hanno trovato alcune strategie che possono aiutare le persone a distinguere le teorie plausibili da quelle che sono quasi sicuramente false, strategie che sembrano diventare ogni giorno più importanti.

2

3

4

Brendan Smialowski/Getty Images (2); Alamy (3); Jeff Swensen/Getty Images (4)

una decina di pacchi-bomba sono stati inviati a personaggi di rilievo del Partito Democratico statunitense, a persone che criticavano Trump e alla CNN, diverse personalità conservatrici si sono affrettate a suggerire che in realtà quegli esplosivi fossero una *false flag*, un attacco falso orchestrato dai Democratici per mobilitare i propri sostenitori durante le elezioni di metà mandato (*midterm elections*) negli Stati Uniti.

Una causa evidente della maggiore visibilità attuale di questo genere di pensiero è il fatto che il presidente degli Stati Uniti sia un complottista dichiarato. Donald Trump ha suggerito, tra le altre cose, che il padre del senatore Ted Cruz, del Texas, abbia collaborato all'assassinio del presidente John F. Kennedy e che i Democratici abbiano sovvenzionato la carovana di migranti che andava dall'Honduras verso gli Stati Uniti, la stessa carovana che aveva preoccupato l'uomo che ha sparato nella sinagoga di Pittsburgh.

Ma sono in gioco anche altri fattori. Nuove ricerche indicano che gli eventi che si stanno verificando in tutto il mondo favoriscono la crescita di emozioni di fondo che rendono le persone più disposte a credere all'esistenza di cospirazioni. Alcuni esperimenti hanno rivelato che le sensazioni di ansia spingono le persone a pensare in un modo che si avvicina di più al complottismo. Stando ai sondaggi, molti statunitensi sono in preda a questo genere di sensazioni, come pure all'idea di non aver più voce in capitolo. In situazioni del genere una teoria del complotto

Il collegamento con l'ansia

Nel maggio 2018 l'American Psychiatric Association ha presentato i risultati di un sondaggio condotto a livello nazionale secondo i quali il 39 per cento degli statunitensi è più ansioso rispetto a un anno fa, soprattutto per quanto riguarda salute, sicurezza, situazione economica, politica e relazioni. Un altro rapporto nel 2017 indicava che il 63 per cento degli statunitensi è molto preoccupato per il futuro del paese e che il 59 per cento considera quello attuale come il punto più basso di cui abbia memoria nella storia degli Stati Uniti. Queste sensazioni sono diffuse su tutto lo spettro delle posizioni politiche. Nel 2018 un sondaggio dello statunitense Pew Research Center ha scoperto che la maggioranza sia dei Democratici sia dei Repubblicani aveva l'impressione che negli ultimi anni il proprio partito avesse perso terreno su questioni che considera importanti.

Queste crisi esistenziali possono favorire il pensiero complottista. In uno studio condotto nel 2015 nei Paesi Bassi, i ricercatori hanno diviso alcuni studenti universitari in tre gruppi. Quelli del primo gruppo sono stati predisposti a sentirsi impotenti: i ricercatori hanno chiesto loro di ricordare e raccontare per iscritto un momento della vita quando sentivano di non avere il controllo della situazione in cui si trovavano. Quelli del secondo gruppo sono stati orientati nella direzione opposta: è stato chiesto loro di raccontare per iscritto di una volta in cui avevano la sensazio-

ne di avere il controllo totale di una situazione. E agli altri, a quelli del terzo gruppo, è stata posta una domanda neutra: descrivere che cosa avevano mangiato a cena la sera prima. Poi i ricercatori hanno chiesto a tutti i gruppi un'opinione sulla nuova linea della metropolitana di Amsterdam, la cui costruzione era stata rallentata da una lunga serie di problemi.

Rispetto agli studenti degli altri due gruppi, quelli che erano stati predisposti a sentire di avere il controllo della situazione erano meno portati a sostenere le teorie del complotto a proposito della linea della metropolitana, per esempio l'idea che il consiglio municipale rubasse i soldi destinati alla costruzione o che stesse intenzionalmente mettendo a rischio la sicurezza dei residenti. Altri studi hanno scoperto effetti simili. Per esempio, nel 2016 Swami e colleghi hanno riferito che chi si sente stressato ha maggiori probabilità di credere alle teorie del complotto e nel 2017 un altro studio ha scoperto che favorire l'ansia nelle persone le rende più prone al pensiero complottista.

Sembra che anche sentirsi estraniati o indesiderati renda più appetibile il pensiero complottista. Nel 2017 alcuni psicologi della Princeton University hanno organizzato un esperimento su gruppi di tre persone. I ricercatori hanno chiesto a tutti i partecipanti di scrivere due paragrafi in cui descrivevano se stessi e poi hanno detto loro che le descrizioni sarebbero state condivise con gli altri due membri del gruppo di appartenenza, che avrebbero usato le informazioni per decidere se volevano collaborare con quella persona in seguito. Dopo aver detto ad alcuni partecipanti che erano stati accettati dal gruppo e ad altri che erano stati rifiutati, i ricercatori hanno valutato le opinioni dei volontari a proposito di vari scenari collegati a teorie del complotto. I partecipanti «rifiutati», sentendosi estraniati, avevano maggiori probabilità di pensare che quegli scenari implicavano una cospirazione coordinata.

Non sono solo le crisi personali a incoraggiare le persone a sospettare cospirazioni, lo fanno anche le battute d'arresto collettive della società. In uno studio del 2018 alcuni ricercatori dell'Università del Minnesota e della Lehigh University, in Pennsylvania, hanno proposto un sondaggio a oltre 3000 cittadini degli Stati Uniti e hanno scoperto che quelli convinti che i valori statunitensi stiano scomparendo hanno maggiori probabilità di concordare con affermazioni complottiste, per esempio quella che «molti grandi eventi hanno dietro di loro le azioni di un gruppetto di persone influenti». Joseph Uscinski, esperto di scienze politiche all'Università di Miami, e colleghi hanno dimostrato che chi non apprezza il partito che si trova al potere ha una mentalità più complottista rispetto a chi lo sostiene. Di recente negli Stati Uniti, con l'ascesa al governo dei conservatori, i liberali hanno avanzato numerose ipotesi non dimostrate, accusando tra l'altro la Casa Bianca di aver obbligato Anthony Kennedy a ritirarsi dalla sua posizione di giudice della Corte Suprema e insinuando che il presidente russo Vladimir Putin stia ricattando Trump con un video in cui lo si vedrebbe mentre guarda alcune prostitute che urinano su un letto in un hotel di Mosca.

Quando le sensazioni di estraniamento personale o di ansia si abbinano all'idea che la società sia a rischio, per le persone è una sorta di attacco complottista su due fronti. In uno studio del 2009, agli inizi della recessione negli Stati Uniti, Daniel Sullivan, psicologo che oggi lavora all'Università dell'Arizona, e colleghi hanno detto ad alcuni partecipanti che avevano pochissimo controllo sulla propria vita perché potevano essere esposti a un disastro naturale o a una catastrofe di altro tipo, mentre ad altri hanno detto che avevano tutto sotto controllo. Ai partecipanti poi è stato chiesto di leggere saggi che sostenevano che il governo stesse gestendo la crisi economica bene oppure male. I soggetti predisposti nel senso del mancato controllo sulla propria vita e a cui si diceva che il governo stava facendo un pessimo lavoro erano quelli che con più probabilità pensavano che gli eventi negativi delle loro vite fossero causati da nemici piuttosto che dal caso, un atteggiamento che è uno dei tratti distintivi del pensiero complottista.

Se gli esseri umani cercano conforto nelle teorie del complotto, è però raro che lo trovino. «Le teorie sono allettanti, ma non per forza soddisfacenti», afferma Daniel Jolley, psicologo all'Università dello Staffordshire, nel Regno Unito. Per cominciare, il pensiero complottista può spingere gli individui a comportarsi in modi che aumentano il loro senso di impotenza e che quindi li fanno sentire ancora peggio. Uno studio del 2014, di cui Jolley è stato coautore, ha scoperto che le persone a cui vengono presentate teorie del complotto a proposito del cambiamento climatico (per esempio che gli scienziati siano solo a caccia di fondi pubblici) hanno meno probabilità di voler votare, mentre uno studio del 2017 ha mostrato che credere in teorie del complotto in ambito lavorativo (per esempio l'idea che i dirigenti prendano decisioni per favorire i propri interessi personali) spinge le persone a impegnarsi di meno sul lavoro. «La situazione può precipitare, e trasformarsi in un circolo vizioso davvero brutto di inazione e comportamenti negativi», spiega Karen Douglas, psicologa dell'Università del Kent, nel Regno Unito, e coautrice dell'articolo sulle teorie del complotto in ambito lavorativo.

Quando le sensazioni di estraniamento o di ansia si abbinano all'idea che la società sia a rischio, per le persone è una sorta di attacco complottista su due fronti, secondo uno studio condotto negli Stati Uniti agli inizi della grande recessione

Le convinzioni negative e alienanti possono anche favorire comportamenti pericolosi in certi individui, come è avvenuto nei casi della sparatoria a Pittsburgh e dell'attacco alla pizzeria. Però le teorie non hanno bisogno delle armi per fare danni. Chi crede nelle teorie del complotto a proposito dei vaccini, per esempio, afferma di essere meno favorevole a vaccinare i propri figli, il che crea sacche di popolazione in cui le malattie infettive persistono e che mettono a rischio intere comunità.

Distinguere la realtà dalla fantasia

Forse è possibile soffocare la nascita di teorie del complotto, almeno fino a un certo punto. Una domanda che ci si pone da tempo è se sia o meno una buona idea usare la logica e le prove per rispondere a chi le sostiene. Alcuni studi più vecchi parlano di un «effetto boomerang», sostenendo che confutare la disinformazione possa semplicemente portare le singole persone a impuntarsi ancora di più. «Se credi che ci siano grandi forze che cospirano per

nascondere le cose e qualcuno ti propone quella che a te sembra una storia di copertura, serve solo a confermarti che hai ragione», spiega Uscinski.

Tuttavia alcuni studi più recenti suggeriscono che questo presunto effetto in realtà sia raro. Uno studio del 2016 riferisce che quando i ricercatori confutavano una teoria del complotto sottolineandone le contraddizioni logiche essa perdeva il suo fascino. E in un articolo pubblicato on line nel 2018 su «Political Behavior» i ricercatori hanno reclutato più di 10.000 persone e hanno presentato loro varie correzioni a diverse affermazioni fatte da esponenti politici, concludendo che «le prove di un vero effetto boomerang sono molto più deboli di quanto suggerito dagli studi precedenti».

In un recente articolo di rassegna della letteratura, i ricercatori che per primi avevano descritto l'effetto boomerang hanno affermato che potrebbe presentarsi più spesso quando le persone vedono messe in questione le idee che definiscono la loro visione del mondo o di se stessi. Quindi una strategia efficace sarebbe trovare modi di contrastare le teorie del complotto senza mettere in discussione l'identità della persona.

Le teorie del complotto sono una reazione umana a un'epoca confusa. «Cerchiamo tutti, semplicemente, di capire il mondo e quello che vi accade», afferma lo psicologo Rob Brotherton, autore di un libro sull'argomento

Anche incoraggiare il pensiero analitico può aiutare. In uno studio del 2014 pubblicato su «Cognition», Swami e colleghi hanno condotto un esperimento su 112 persone. Per prima cosa hanno chiesto a tutti i volontari coinvolti di compilare un questionario che valutava quanto credessero in diverse teorie del complotto. Qualche settimana dopo, i volontari sono tornati in laboratorio e i ricercatori li hanno divisi in due gruppi. Il primo doveva portare a termine un esercizio in cui doveva anagrammare alcune parole in frasi che includevano termini come «analizzare» e «razionale», il che li spingeva a pensare in modo più analitico; il secondo gruppo invece doveva eseguire un compito neutro.

In seguito i ricercatori hanno distribuito di nuovo il questionario sulle teorie del complotto ai due gruppi. Anche se all'inizio dell'esperimento i due gruppi non erano diversi in termini di pensiero complottista, i partecipanti che erano stati spinti a pensare in modo analitico erano diventati meno complottisti. Quindi se diamo alle persone «gli strumenti e le capacità per analizzare i dati e guardarli in modo critico e obiettivo» potremmo riuscire a soffocare il pensiero complottista, afferma Swami.

Il pensiero analitico aiuta anche a distinguere le teorie implausibili da quelle che, per quanto sembrino assurde, sono sostenute da prove. Karen Murphy, psicologa dell'educazione alla Pennsylvania State University, suggerisce che chi voglia migliorare le proprie capacità di pensiero analitico dovrebbe porsi tre domande quando vuole interpretare un'affermazione complottista. Che prove hai? Qual è la fonte delle prove? Qual è il ragionamento che collega le prove all'affermazione? La fonte delle prove deve essere accurata, credibile e rilevante. Per esempio «non dovresti ascoltare tua madre per capire se quel colore giallo che hai sotto le unghie sia un brutto segno», spiega Murphy: quel genere di informazioni dovrebbe venire da un esperto dell'argomento, come un medico.

Inoltre le false teorie del complotto hanno segni caratteristici tipici, afferma Lewandowsky. Tre di questi sono particolarmente evidenti. Primo, le teorie includono contraddizioni. Per esempio, alcuni negazionisti del cambiamento climatico sostengono che non ci sia un consenso scientifico sull'argomento e allo stesso tempo si presentano come eroi che combattono contro il consenso. Non possono essere vere entrambe le cose. Un secondo segnale evidente è quando un'affermazione si basa su premesse traballanti. Per esempio, Trump ha sostenuto che milioni di immigrati illegali abbiano votato nelle elezioni presidenziali del 2016 e che sia stato quello il motivo per cui ha perso il voto popolare. A parte l'assoluta mancanza di prove, la sua premessa è che gran parte di quei voti, se fossero esistiti, sarebbero andati al suo avversario, il Partito Democratico. Eppure i sondaggi condotti in passato tra gli immigrati ispanici irregolari suggeriscono che molti di loro avrebbero preferito un candidato repubblicano a uno democratico.

Un terzo segnale del fatto che un'affermazione sia una teoria improbabile, anziché un vero complotto è che coloro che la sostengono interpretano le prove contro la teoria come prove a suo favore. Per esempio, quando il furgoncino di Cesar Sayoc, presunto responsabile dei pacchi-bomba del 2018, è stato trovato in Florida coperto di adesivi a favore di Trump, alcune persone hanno affermato che questo aiutava a dimostrare che c'erano veramente i democratici dietro all'operazione. «Se qualcuno pensa che il furgoncino di un conservatore abbia questo aspetto, è volutamente ignorante. È chiaro che Cesar Sayoc è solo il capro espiatorio di questa evidente contraffazione», ha scritto una persona su Twitter.

Le teorie del complotto sono una reazione umana a un'epoca confusa. «Cerchiamo tutti, semplicemente, di capire il mondo e quello che vi accade», afferma Rob Brotherton, psicologo al Barnard College di New York e autore di *Menti sospettose. Perché siamo tutti complottisti* (Bollati Boringhieri, 2017). Ma da questo tipo di pensiero possono derivare danni reali, soprattutto quando chi ci crede usa la violenza per dimostrare il suo sostegno. Se facciamo attenzione agli indizi sospetti e poniamo domande ben ponderate sulle storie che sentiamo, è ancora possibile distinguere la realtà dalle menzogne. Non è sempre facile, ma è molto importante, per tutti noi. ■

PER APPROFONDIRE

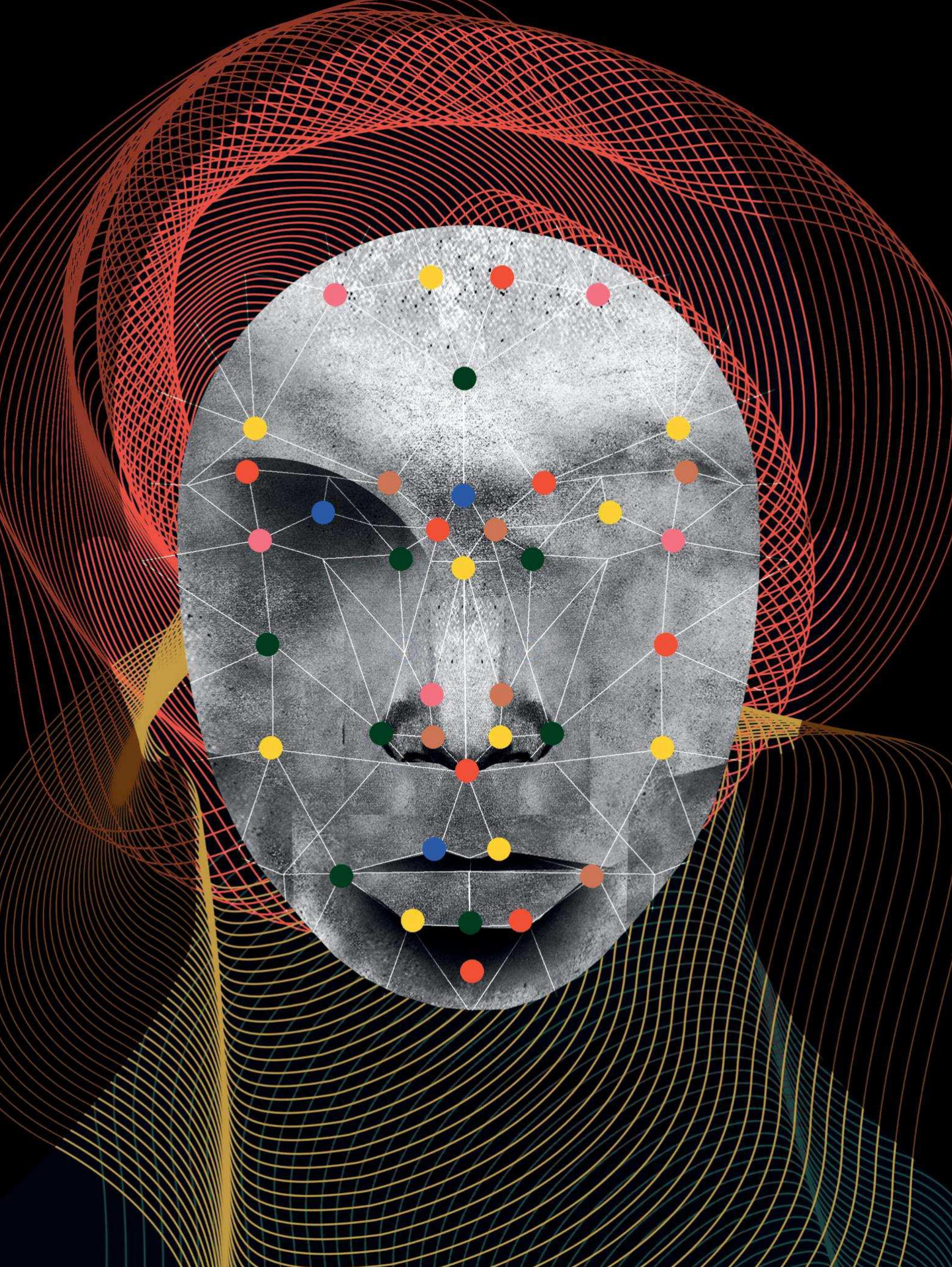
NASA Faked the Moon Landing—Therefore, (Climate) Science Is a Hoax: An Anatomy of the Motivated Rejection of Science. Lewandowsky S. e altri, in «Psychological Science», Vol. 24, n. 5, pp. 622-633, maggio 2013.

The Influence of Control on Belief in Conspiracy Theories: Conceptual and Applied Extensions. van Prooijen J.-W. e Acker M., in «Applied Cognitive Psychology», Vol. 29, n. 5, pp. 753-761, settembre-ottobre 2015.

Putting the Stress on Conspiracy Theories: Examining Associations between Psychological Stress, Anxiety, and Belief in Conspiracy Theories. Swami V. e altri, in «Personality and Individual Differences», Vol. 99, pp. 72-76, settembre 2016.

Suspicion in the Workplace: Organizational Conspiracy Theories and Work-Related Outcomes. Douglas K.M. e Leite A.C., in «British Journal of Psychology», Vol. 108, n. 3, pp. 486-506, agosto 2017.

NEUROSCIENZE

Il codice neurale dei volti

Regioni cerebrali che elaborano i volti ci permettono di capire in profondità i meccanismi neuronali della visione

di Doris Y. Tsao

Un giorno, ai tempi delle scuole superiori, mentre seguivo un corso introduttivo al calcolo, venni a conoscenza della densità delle curve. Una semplice coppia di equazioni differenziali, che crea un modello delle interazioni tra predatori e preda, può generare un numero infinito di curve chiuse: immaginate cerchi concentrici, uno annidato nell'altro, come in un bersaglio. Come se non bastasse, la densità di queste curve varia in funzione della loro posizione.

Quest'ultimo fatto mi parve davvero strano. Potevo immaginare facilmente un insieme infinito di curve che si avvicinavano o si separavano. Ma come era possibile che un'infinità di curve fosse più densa in una regione e meno densa in un'altra?

Illustrazione di Brian Stauffer

IN BREVE

Comprendere la visione rimane una grande sfida per i neuroscienziati.
Un aspetto decisivo di questo problema riguarda il modo in cui il cervello identifica i volti, l'emblema sociale per eccellenza.
Neuroni in parti ben definite della corteccia cerebrale, le regioni dei volti, sono dedicate al riconoscimento dei visi.
Svelare l'organizzazione del sistema delle regioni dei volti è servito da preludio per ricavare le computazioni sottostanti operate dal cervello per identificare i volti.
Questo codice neurale potrebbe essere usato come una Stele di Rosetta per calcolare altri oggetti, oltre ai volti.

Presto imparai che ci sono differenti tipi di infinito, che hanno qualità paradossali, come il Grand Hotel di Hilbert (dove le stanze sono sempre tutte prenotate, ma nuovi ospiti possono sempre essere alloggiati) e come la mela di Banach-Tarski (che può essere divisa in cinque pezzi e riorganizzata per farne due mele di volume uguale alla mela originale).

Ho trascorso ore spremendomi su questi teoremi matematici. In fondo mi erano sembrati una magia simbolica, senza reali conseguenze. Ma il seme dell'interesse aveva attecchito.

In seguito, quando studiavo al California Institute of Technology (Caltech), venni a conoscenza degli esperimenti di David Hubel e Torsten Wiesel, e della loro scoperta epocale di come una regione del cervello, la corteccia visiva primaria, estrae i margini dalle immagini trasmesse dagli occhi. Mi resi conto che, a disorientarmi ai tempi delle superiori, era stato l'atto di provare a immaginare differenti densità di infinito. A differenza dei trucchi matematici che avevo studiato alle superiori, i margini descritti da Hubel e Wiesel sono elaborati da neuroni, e quindi esistono realmente nel cervello. E soprattutto riconobbi che la neuroscienza della visione era un modo per capire come questa attività neurale fa emergere la percezione cosciente di una curva.

Il senso di entusiasmo provocato da questa consapevolezza è difficile da descrivere. Credo che in ciascuna fase della vita ognuno abbia un dovere. E il dovere di uno studente universitario è sognare; è scoprire la cosa che cattura il tuo cuore, e che sembra degna di dedicarle la vita intera. In effetti, questo è il singolo passo più importante nella scienza: trovare il giusto problema. Sono stata ammaliata dall'impresa di capire la visione e mi sono imbarcata nell'avventura di comprendere come schemi di attività elettrica nel cervello codificano percezioni di oggetti visivi: non solo linee e curve, ma persino oggetti difficili da definire come i volti. Raggiungere questo obiettivo implicava localizzare le regioni cerebrali dedicate al riconoscimento dei volti e decifrare il codice neurale sottostante, ovvero i mezzi con cui uno schema di impulsi elettrici ci permette di identificare le persone intorno a noi.

Il viaggio verso la scoperta è iniziato ai tempi della scuola di specializzazione, alla Harvard University, dove studiavo la stereopsi (o anche stereopsia), il meccanismo mediante cui la percezione della profondità emerge da differenze tra le immagini nei due occhi. Un giorno scoprii un articolo della neuroscienziata Nancy Kanwisher, del Massachusetts Institute of Technology, e dei suoi colleghi. Riferiva la scoperta di un'area nel cervello umano che rispondeva molto più intensamente a immagini di volti che a immagini di qualsiasi altro oggetto quando il soggetto era disteso in uno *scanner* cerebrale per la risonanza magnetica funzionale (fMRI). L'articolo mi sembrava insolito. Ero abituata all'idea del cervello come composto di parti con nomi come gangli basali e corteccia orbitofrontale, che avevano una qualche vaga finalità che si poteva solo iniziare ad afferrare. Il concetto di un'area specifica per l'elaborazione dei volti sembrava fin troppo comprensibile, e quindi impossibile. Chiunque poteva fare un'ipotesi ragionevole sulla funzione di un'area dei volti: probabilmente dovrebbe rappresentare tutti i differenti volti che conosciamo e qualcosa sulla loro espressione e sul genere sessuale.

Fresca di laurea, impiegai la fMRI con le scimmie per identificare aree attivate dalla percezione della tridimensionalità nelle immagini. Decisi di mostrare a una scimmia immagini di volti e di altri oggetti. Quando ho confrontato l'attivazione nel cervello ai volti rispetto a quella ad altri oggetti, ho trovato che diverse aree del lobo temporale (la regione sottostante alla tempia) si attivavano selettivamente ai volti; in particolare in una regione detta corteccia inferotemporale (IT). Già nei primi anni settanta Charles Gross, un pioniere nel campo della visione degli oggetti, aveva scoperto neuroni selettivi per i volti nella corteccia dei macachi. Ma aveva riferito che queste cellule erano diffuse in modo casuale nella corteccia IT. I nostri risultati con la fMRI hanno fornito la prima indicazione che le cellule dei volti potrebbero, invece, essere concentrate in regioni definite.

Doris Y. Tsao è professoressa di biologia al California Institute of Technology (Caltech) e ricercatrice allo Howard Hughes Medical Institute. È anche direttore del Tianqiao & Chrissy Chen Center for Systems Neuroscience, al Caltech.

Le regioni cerebrali dei volti

Una volta pubblicato il lavoro fui invitata a tenere una conferenza per descrivere il mio studio con la fMRI, un *job talk*. Era per ottenere un posto al Caltech, che poi non ebbi. Molti si dichiaravano scettici sul valore della fMRI, che misura il flusso sanguigno locale, il sistema di tubazioni del cervello. Sostenevano che mostrare un aumento del flusso sanguigno in un'area cerebrale quando un soggetto guarda dei volti è ben lontano dal chiarire che cosa stanno codificando i neuroni di quell'area, perché incerta è la relazione tra flusso sanguigno e attività elettrica. Forse per puro caso, queste zone dei volti contenevano semplicemente un numero appena maggiore di neuroni sensibili ai volti, come iceberg raggruppati in modo casuale nel mare.

Neuroni selettivi per i volti erano stati scoperti già negli anni settanta nella corteccia dei macachi

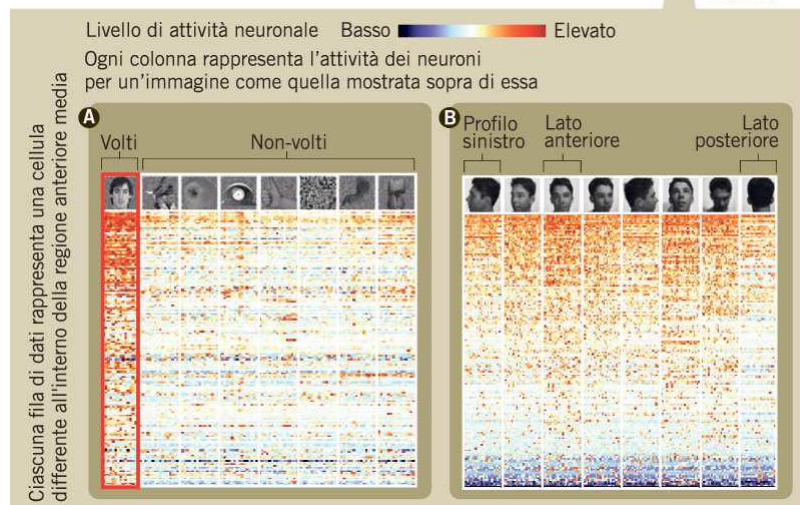
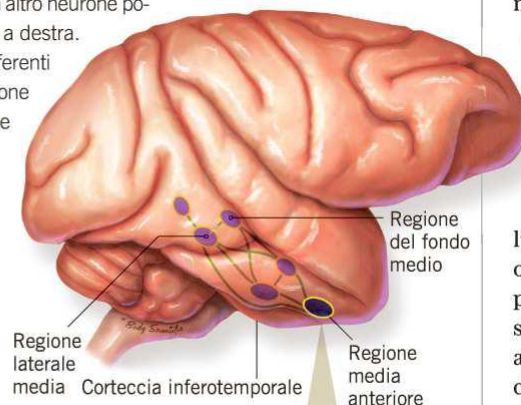
Avendo condotto i miei esperimenti di imaging cerebrale su una scimmia, ho potuto affrontare direttamente questo problema inserendo un elettrodo in un'area dei volti identificata con la fMRI, e mi sono chiesta: quali immagini attivano con più forza i singoli neuroni in quest'area? Ho fatto l'esperimento insieme a Winrich Freiwald, che all'epoca aveva una borsa di studio nel laboratorio di Margaret Livingstone alla Harvard University, dove mi stavo specializzando. Abbiamo mostrato volti e altri oggetti a una scimmia, amplificando al contempo l'attività elettrica di singoli neuroni registrati dall'elettrodo. Per esaminare le risposte in tempo reale, i segnali elettrici dei neuroni sono stati convertiti in segnali acustici, che potevamo ascoltare con un altoparlante in laboratorio.

Questo esperimento ha rivelato un risultato sorprendente: quasi ogni singola cellula in quell'area era dedita all'elaborazione dei volti. Ricordo l'entusiasmo della nostra prima registrazione, quando udimmo lo «scoppiettio» di una cellula dopo l'altra mentre rispondevano intensamente ai volti e assai poco ad altri oggetti. Sentimmo di avere scoperto qualcosa d'i importante: un pezzo di corteccia che poteva rivelare il codice di alto livello del cervello per gli oggetti visivi. Livingstone commentò così le regioni dei volti: «Avete scoperto la gallina dalle uova d'oro».

Ricordo anche che fui sorpresa durante il primo esperimento.

Dove sono i rivelatori dei volti?

Un insieme di sei nodi nella corteccia inferotemporale (IT) di entrambi gli emisferi cerebrali è specializzato nell'identificazione dei volti. Queste «regioni dei volti» funzionano come una catena di montaggio: nella regione laterale media e nel fondo medio un neurone si attiva quando i volti guardano perfettamente in avanti; un altro neurone potrebbe attivarsi per un volto che guarda a destra. Alla fine della catena di montaggio, le differenti prospettive sono cucite insieme nella regione media anteriore. Neuroni in questa regione sono attivi come risposta al volto di un individuo specifico, che la prospettiva sia frontale oppure laterale. Risposte da una regione dei volti di una scimmia sono generate dai volti ma non da oggetti (*aree rosse in* **A**), e per lo stesso individuo, come l'uomo dai capelli scuri, da angoli varianti (*aree rosse in* **B**).

Illustrazione di Body Scientific (*cervello*); da *Functional Compartmentalization and Viewpoint Generalization Within the Macaque Face-Processing System*, di Winrich A. Freiwald e Doris Y. Tsao, in «Science», Vol. 330, 5 novembre 2010 (*griglie dati e riquadri con foto*)

Mi aspettavo che l'area dei volti avrebbe contenuto cellule che rispondevano selettivamente a individui specifici, analoghe alle cellule selettive per l'orientamento nella corteccia visiva primaria, che rispondono, ognuna, a uno specifico orientamento dei margini. In effetti, diversi studi ormai di dominio pubblico avevano suggerito che singoli neuroni possono essere notevolmente selettivi per volti di persone familiari; neuroni capaci di rispondere, per esempio, solo a Jennifer Aniston. Contrariamente alla mia aspettativa, ciascuna cellula sembrava rispondere vigorosamente quasi a ogni volto.

In questi primi esperimenti ho lavorato alacremente con Photoshop, il diffuso programma di ritocco fotografico, e ho scoperto che le cellule rispondevano, oltre che a volti umani e di scimmie, addirittura a volti di fumetti molto semplificati.

Osservando questo fenomeno ho deciso di creare volti di fumetti con 19 tratti differenti che sembravano idonei a definire l'identità di un volto; tratti come la distanza tra i due occhi, il rapporto d'aspetto (o rapporto lunghezza/larghezza) del volto e l'altezza della bocca. In seguito abbiamo modificato questi valori. Per esempio, la distanza tra gli occhi variava da quasi ciclopica fino ai confini esterni del volto. Le singole cellule rispondevano alla maggior parte dei volti ma – cosa interessante – non manifestavano sempre la stessa frequenza di scarica per ogni volto. C'era, invece, una variazione sistematica nella loro risposta: quando abbiamo disegnato il grafico della scarica delle cellule in funzione dei tratti delle caricature abbiamo scoperto uno schema in cui vi era una risposta minima a un estremo della caratteristica – la distanza tra gli occhi minima, per esempio – e una risposta massima per l'estremo opposto – la separazione tra gli occhi massima – con risposte intermedie per valori intermedi dei tratti. La risposta in funzione del valore di ciascun tratto aveva l'aspetto di una rampa, una linea inclinata verso l'alto o verso il basso.

Fui nuovamente invitata al Caltech, per tenere un nuovo colloquio di lavoro. Questa volta avevo da offrire ben più di semplici immagini fMRI. Con l'aggiunta di nuovi risultati da registrazioni di singole cellule, era chiaro a tutti che queste regioni dei volti erano reali e avevano probabilmente un ruolo importante nel riconoscimento dei volti.

In più, comprendere i loro processi neurali sembrava una via efficace per progredire nel problema più generale, vale a dire come il cervello rappresenta gli oggetti visivi. Quella volta ottenni il posto.

Il segreto è nel contrasto

Insieme ai miei colleghi al Caltech ho approfondito la questione di come queste cellule rilevano i volti. Ci ha ispirato un articolo di Pawan Sinha, esperto di visione nei computer al Massachusetts Institute of Technology (MIT). Sinha ha proposto che i volti potrebbero essere rivelati controllando specifiche relazioni per contrasto tra parti differenti del volto: se la regione della fronte è più chiara della regione della bocca, per esempio. Sinha ha suggerito un modo ingegnoso per determinare quali relazioni di contrasto possono essere usate per riconoscere un volto: dovrebbero essere quelle immuni da variazioni di illuminazione. Per esempio, occhio-sinistro-più-scuro-del-naso è una caratteristica utile per rivelare un volto, perché non importa se un volto è fotografato con un'illuminazione dall'alto, da sinistra, da destra, oppure dal basso: l'occhio sinistro è sempre più scuro del naso (verificate voi stessi).

Da un punto di vista teorico, questa idea fornisce un meccanismo computazionale del riconoscimento facciale semplice ed elegante, e ci siamo chiesti se le cellule dei volti lo usino. Quando abbiamo misurato la risposta delle cellule a volti in cui regioni differenti variavano di luminosità, abbiamo scoperto che spesso le cellule avevano una significativa preferenza per un particolare elemento di contrasto in un'immagine.

Con nostro stupore, quasi tutte le cellule erano coerenti nelle loro preferenze di contrasto: solo una singola cellula ha preferito la relazione di contrasto opposta. Inoltre, i caratteri preferiti erano gli stessi identificati da Sinha come immuni a variazioni di illuminazione. L'esperimento ha così confermato che le cellule dei volti usano relazioni di contrasto per rilevare i volti.

Più in generale, il risultato confermava la nostra ipotesi. Nel corso dei nostri seminari, gli scettici ci domandavano: come fate a saperlo? Non potete verificare ogni possibile stimolo. Come fate a essere certi che non sia una cellula per i melograni o una cellula per i tosaerba? Questo risultato ha messo le cose a posto. La corrispondenza precisa tra le reazioni delle cellule a variazioni di contrasto e la previsione computazionale di Sinha era sorprendente.

I nostri esperimenti iniziali avevano rivelato due aree corticali adiacenti che si attivavano con i volti. Ma dopo ulteriori scansioni (con l'aiuto di un mezzo di contrasto che aumentava di diverse volte l'intensità del segnale), divenne chiaro che ci sono sei regioni dei volti in ciascuno dei due emisferi cerebrali (il che ammonta a una dozzina di uova d'oro in totale). Sono distribuite lungo l'intera lunghezza del lobo temporale. In più, queste sei regioni sono distribuite in modo casuale nella corteccia IT. Sono situate in posizioni simili negli emisferi di animali differenti. Inoltre, il lavoro del nostro e di altri gruppi ha scoperto che esiste uno schema simile di molteplici regioni dei volti diffuse nella corteccia IT nell'essere umano e in altri primati, per esempio nelle scimmie uistitì.

Questa osservazione di uno schema stereotipato ha suggerito che le regioni potrebbero costituire una sorta di catena di montaggio per elaborare i volti. In questo caso ci aspettiamo che le sei regioni siano connesse tra loro, e che ciascuna regione svolga una funzione distinta.

Per esplorare le connessioni neurali tra le regioni dei volti abbiamo stimolato elettricamente regioni differenti con quantità minime di corrente – una tecnica detta microstimolazione – mentre la scimmia era distesa in uno scanner per la fMRI. L'obiettivo era scoprire quali altre parti del cervello si attivano quando è stimolata una particolare regione dei volti. Come abbiamo scoperto, ogni volta che stimolavamo una regione dei volti le altre regioni si attivavano, ma non la corteccia circostante. Questo indicava che le regioni dei volti stabiliscono forti connessioni tra loro. Inoltre, abbiamo scoperto che ciascuna regione svolge una funzione differente. Abbiamo mostrato ad alcune scimmie immagini di 25 persone, ciascuna con otto differenti orientamenti della testa, e abbiamo registrato le risposte di cellule in tre regioni dei volti: la regione laterale media e la regione del fondo medio (ML/MF), la regione laterale anteriore (AL) e la regione media anteriore (AM).

Abbiamo riscontrato differenze sorprendenti tra le tre regioni. Nelle ML/MF, le cellule rispondevano selettivamente a specifiche direzioni dello sguardo. Per esempio, una cellula preferiva volti che guardano in avanti, e un'altra cellula volti rivolti a sinistra. In AL le cellule erano meno specifiche per la direzione dello sguardo. Una classe di cellule rispondeva a volti che guardavano in su, in giù e in avanti; un'altra rispondeva a volti che guardavano a sinistra o a destra. In AM, le cellule rispondevano a individui specifici, che la visione del volto fosse frontale oppure di profilo. Così, alla fine della rete in AM, rappresentazioni specifiche della direzione dello sguardo erano cucite con successo in una rappresentazione invariante rispetto alla direzione dello sguardo.

A quanto pare, le regioni dei volti agiscono come una catena di montaggio per risolvere una delle sfide più grandi della visione: riconoscere le cose intorno a noi nonostante le variazioni della loro apparenza. Un'automobile può essere di qualunque marca e colore, comparire per qualunque angolo di visuale e distanza ed essere parzialmente coperta da oggetti più vicini, come alberi e altre

LA RELAZIONE

Forma + apparenza = volto

Identificare le regioni dei volti è stato solo un primo passo. Poi è diventato necessario esplorare che cosa succede ai neuroni all'interno di ciascuna regione, avviando una ricerca dello schema di codifica dei volti nel cervello. Per ricavare misure quantitative dei volti, il laboratorio di Tsao ha concepito 25 tratti per la forma e 25 tratti per l'apparenza, che potrebbero essere usati da ciascun neurone in una regione dei volti, uno spazio dei volti 50-dimensionale. I tratti per la forma si possono concepire come quelli che definiscono lo scheletro: per esempio l'ampiezza della testa oppure la distanza tra gli occhi. I tratti dell'apparenza specificano la trama superficiale (la carnagione, il colore degli occhi e dei capelli, e così via).

Forma: descritta dalla posizione (coordinate x, y) di punti di repere dei tratti (pallini gialli)

Esempi di variabilità

Forma media

Apparenza: variazioni di luminosità dell'immagine dopo averla prima allineata per farla combaciare con la forma media dei volti

Esempi di variabilità

Grafica di Jen Christiansen; da *The Code for Facial Identity in the Primate Brain*, di Le Chang e Doris Y. Tsao, in «Cell», Vol. 169, n. 6, 1° giugno 2017 *(immagini volti)*

Il codice dei volti, finalmente

Avere 50 coordinate che descrivono la forma e l'apparenza permette di descrivere la scarica dei neuroni come risposta a un particolare volto: una descrizione che fa da codice visualizzabile geometricamente. In questo codice, ciascuna cellula dei volti riceve segnali in arrivo per un volto sotto forma di 50 coordinate, o dimensioni. Poi il neurone scarica con una particolare intensità come risposta a un particolare volto (*cerchi rossi*), lungo il cosiddetto asse preferito. L'intensità aumenta in modo costante (in modo monotono) lungo l'asse preferito. Inoltre, la risposta è la stessa per ogni volto su un asse per angoli retti rispetto all'asse preferito, sebbene quei volti possano apparire molto differenti. Questo modello della codifica dei volti basato sugli assi differisce da un precedente modello basato su campioni, per il quale ciascun neurone scarica con intensità massima a un singolo volto, il volto preferito.

Da *The Code for Facial Identity in the Primate Brain*, di Le Chang e Doris Y. Tsao, in «Cell», Vol. 169, n. 6, 1° giugno 2017 (*griglia volti*)

automobili. Riconoscere un oggetto nonostante queste trasformazioni visive è detto problema dell'invarianza, e a noi è apparso evidente che una funzione importante della rete delle regioni dei volti sia quella di superare questo ostacolo.

Considerando la grande sensibilità delle cellule nelle regioni dei volti a cambiamenti di identità dei volti, verrebbe da pensare che alterare le risposte di queste cellule dovrebbe modificare, in un animale, la percezione dell'identità dei volti. Josef Parvizi e Kalanit Grill-Spector, neuroscienziati alla Stanford University, avevano stimolato elettricamente un'area della regione dei volti in soggetti umani ai quali erano stati impiantati elettrodi nel cervello per identificare l'origine degli attacchi epilettici. Hanno scoperto che in questi soggetti la stimolazione distorceva la percezione di un volto.

Ci siamo domandati se avremmo osservato lo stesso effetto nelle scimmie, dopo avere stimolato le loro regioni dei volti. Questo intervento avrebbe modificato solo la percezione dei volti o avrebbe influito anche su quella di altri oggetti? Il confine tra un volto e un oggetto non-volto è fluido: è possibile vedere un volto in una nuvola o in una presa elettrica, se siamo sollecitati. Volevamo usare la microstimolazione elettrica come strumento per delineare con precisione che cosa costituisce un volto per una regione dei volti. Abbiamo addestrato alcune scimmie a comunicare se due volti presentati in sequenza erano lo stesso volto oppure volti differenti. In accordo con i risultati precedenti nell'essere umano abbiamo scoperto che la microstimolazione di regioni dei volti distorceva intensamente la percezione. Quindi l'animale segnalava sempre due volti identici come differenti.

Curiosamente, la microstimolazione non aveva effetti sulla percezione di molti oggetti non-volti, pur influenzando significativamente le risposte ad alcuni oggetti la cui forma è compatibile con un volto: mele, per esempio. Ma perché la microstimolazione di una regione dei volti influisce sulla percezione di una mela?

Una possibilità è che le regioni dei volti siano usate in genere per rappresentare, oltre che volti, anche altri oggetti rotondi, come le mele. Un'altra ipotesi è che le regioni dei volti non siano usate, di regola, per rappresentare questi oggetti, ma che la stimolazione induca una mela a sembrare simile a una faccia. Resta da chiarire se le regioni dei volti siano utili per rivelare qualsiasi oggetto non-volto.

Violare il codice

Svelare l'organizzazione del sistema delle regioni dei volti e le proprietà delle cellule al suo interno è stato un grande risultato. Ma il mio sogno, quando registrammo la prima volta le regioni dei volti, era ottenere qualcosa di più. Avevo intuito che queste cellule ci avrebbero permesso di violare il codice neurale della identità dei volti. Significa capire come singoli neuroni elaborano i volti a un livello di dettaglio che ci permette di prevedere la risposta di una cellula a un qualsiasi volto, o di decodificare l'identità di un volto arbitrario semplicemente a partire dall'attività neurale.

La grande sfida era escogitare un modo per descrivere i volti quantitativamente con grande precisione. Le Chang, brillante borsista del mio laboratorio, ha avuto l'idea di adottare una tecnica del campo della visione nei computer, il cosiddetto *active appearance model* (modello dell'apparenza attiva). In questo approccio, un volto ha due insiemi di descrittori, uno per la forma e uno per l'apparenza. Pensate ai tratti delle forme come a quelli definiti dallo scheletro: quanto è larga la testa oppure la distanza tra gli occhi. Le caratteristiche di apparenza definiscono la tessitura di superficie del volto (carnagione, colore degli occhi o dei capelli e così via).

Per generare questi descrittori della forma e dell'apparenza dei volti, siamo partiti da un'ampia banca dati di immagini di volti. Per ciascuno di essi abbiamo collocato un insieme di marcatori su trat-

ti essenziali. Le posizioni spaziali dei marcatori descrivevano la forma di un volto. Dai diversi volti abbiamo calcolato un volto medio. Abbiamo poi trasformato ciascuna immagine dei volti nella banca dati in modo che le sue caratteristiche essenziali corrispondessero esattamente a quella del volto medio. Le immagini risultanti costituivano l'apparenza dei volti, indipendentemente dalla forma. Abbiamo poi eseguito l'analisi delle componenti principali indipendentemente sui descrittori della forma e dell'apparenza per l'intero insieme dei volti. È una tecnica matematica che scopre le dimensioni più variabili in un insieme di dati complesso.

Prendendo le migliori 25 componenti principali per la forma e le migliori 25 per l'apparenza, abbiamo creato uno spazio dei volti 50-dimensionale. Questo spazio è simile al nostro familiare spazio 3D, ma ciascun punto rappresenta un volto invece di una posizione, come le pupille e le narici, e include molto più delle sole tre dimensioni. Lo spazio tridimensionale in un qualsiasi punto può essere descritto da tre coordinate (x, y, z). Per uno spazio dei volti 50-D, qualsiasi punto può essere descritto da 50 coordinate.

Nel nostro esperimento abbiamo disegnato in modo casuale 2000 volti e li abbiamo mostrati a una scimmia, mentre registravamo le cellule in due regioni dei volti. Abbiamo scoperto che quasi ogni cellula manifestava risposte graduate – simile a una rampa inclinata verso l'alto o verso il basso – a un sottoinsieme delle 50 caratteristiche. Era in linea con miei esperimenti precedenti con volti di fumetti. Ma avemmo una nuova idea sul perché questo è importante. Se una cellula dei volti ha una sintonia a forma di rampa per caratteristiche differenti, la sua risposta può essere approssimata da una semplice somma pesata delle caratteristiche facciali, dove i pesi sono determinati dalle pendenze delle funzioni di sintonia a forma di rampa. In altre parole:

risposta delle cellule dei volti = matrice dei pesi × 50 caratteristiche dei volti

Possiamo poi semplicemente invertire l'equazione e convertirla in una forma che permette di prevedere il volto che verrà mostrato dalle risposte delle cellule dei volti:

50 caratteristiche dei volti = (1/matrice dei pesi) × risposta delle cellule dei volti

L'equazione ci era sembrata fin troppo semplice. Per verificarla abbiamo usato le risposte a tutti i 2000 volti, tranne uno, per imparare la matrice dei pesi, e abbiamo poi provato a prevedere le 50 caratteristiche del volto escluso. Con nostra sorpresa, la previsione si è rivelata quasi indistinguibile dal volto reale.

LA CAPACITÀ PREDITTIVA

Immagini per 205 neuroni

Per ogni particolare volto, possiamo prevedere come una cellula risponderà eseguendo una somma pesata di tutte le 50 coordinate dei volti. Per prevedere il volto visto dalla scimmia basandosi sull'attività dei neuroni, l'intero processo può essere invertito: conoscendo la risposta di 205 cellule dei volti, è possibile prevedere le 50 coordinate degli esatti tratti facciali e fare una ricostruzione molto accurata di un particolare volto.

Doris Y. Tsao (*immagini dei volti*)

Una scommessa doppiamente vantaggiosa

A una conferenza ad Ascona, in Svizzera, ho presentato le nostre scoperte su come abbiamo ricostruito i volti usando l'attività neurale. Dopo il mio intervento Rodrigo Quian Quiroga, che nel 2005 aveva scoperto la celebre cellula di Jennifer Aniston nel lobo temporale medio umano e che ora lavora all'Università di Leicester, nel Regno Unito, mi domandò in quale modo le mie cellule fossero correlate al suo concetto per cui singoli neuroni reagiscono ai volti di persone specifiche. La cellula di Jennifer Aniston, conosciuta anche come cellula della nonna, è un presunto tipo di neurone che si attiva come risposta al volto di una persona riconoscibile, che sia una celebrità oppure un parente stretto.

Risposi a Rodrigo che pensavo che le nostre cellule potevano essere i mattoni delle sue cellule, senza approfondire oltre come questo funzionasse. Quella notte, insonne per il jet lag, compresi una differenza importante tra le nostre cellule dei volti e le sue. Alla conferenza avevo descritto come le nostre cellule dei volti calcolassero la risposta a somme pesate di differenti caratteristiche dei volti. Nel cuore della notte realizzai che questo calcolo è identico all'operazione matematica conosciuta come prodotto scalare. In termini geometrici, può essere rappresentata come la proiezione di un vettore su un asse (come il Sole che proietta al suolo l'ombra di un pennone).

Ricordandomi l'algebra lineare studiata alle superiori, compre-

si come tutto quello implicava che dovremmo riuscire a costruire un grande «spazio nullo» di volti per ciascuna cellula: una serie di volti di identità variabile che giacciono su un asse perpendicolare all'asse di proiezione. Inoltre, tutti questi volti indurrebbero la cellula a scaricare nello stesso identico modo.

A sua volta, questo suggerirebbe che le cellule nelle regioni dei volti siano profondamente differenti dalle cellule della nonna. In effetti demolirebbe la vaga idea che tutti avevano tacitamente condiviso sulle cellule dei volti: che sarebbero sintonizzate su volti specifici.

Fui il primo ad arrivare, alle cinque del mattino successivo, nella sala colazioni della conferenza. Mi auguravo di trovare Rodrigo per raccontargli la mia previsione apparentemente illogica. Con sorpresa, quando finalmente comparve, mi disse che aveva avuto la stessa idea. Facemmo una scommessa, e Rodrigo permise generosamente che i termini fossero a me favorevoli: se fosse risultato che ciascuna cellula aveva la stessa risposta a volti differenti, allora gli avrei inviato una costosa bottiglia di vino; se invece la previsione non si fosse avverata, lui avrebbe dovuto inviarmi del vino di consolazione.

In cerca di una risposta, una volta rientrato al nostro laboratorio al Caltech, Le Chang ha stabilito inizialmente l'asse preferenziale di una data cellula, usando le risposte ai 2000 volti. Poi, mentre ancora registrava la stessa cellula, ha generato un intervallo di volti, che potevano essere collocati su un asse perpendicolare a quello preferito della cellula. La cosa notevole è che tutti questi volti hanno attivato la stessa risposta nella cellula. La settimana successiva Rodrigo avrebbe ricevuto una squisita bottiglia di Cabernet.

Le cellule dei volti non codificano le identità di individui specifici, ma operano calcoli più astratti

Questa scoperta dimostrava che le cellule dei volti non codificano le identità di individui specifici nella corteccia IT, ma che stanno eseguendo una proiezione degli assi, un calcolo molto più astratto.

Si può stabilire un'analogia con il colore. I colori possono essere codificati da nomi specifici, come pervinca, calendula e azzurro; in alternativa, è possibile codificarli con particolari combinazioni di tre semplici numeri che rappresentano le quantità di rosso, di verde e di blu che formano quel colore. Secondo questo schema, una cellula dei colori che esegue una proiezione sull'asse del rosso scaricherebbe impulsi elettrici, o *spike*, proporzionali alla quantità di rosso in ogni colore. Una cellula di questo tipo scaricherebbe con la stessa intensità per un colore marrone oppure giallo che contenesse la stessa quantità di rosso mescolata con altri colori. Le cellule dei volti usano lo stesso schema, tuttavia gli assi, invece di tre soltanto, sono 50. E invece di ciascun asse codificante la quantità di rosso, di verde o di blu, ciascun asse codifica la quantità di deviazione della forma o della apparenza di un dato volto da un volto medio.

A quanto pare, allora, le cellule di Jennifer Aniston non esistono, almeno non nella corteccia IT. Tuttavia, singoli neuroni che rispondono selettivamente a specifici individui familiari potrebbero essere all'opera in una parte del cervello che elabora il prodotto delle cellule dei volti. Regioni dedicate all'archivio dei ricordi – ippocampo e aree circostanti – potrebbero contenere cellule che ci fanno riconoscere un individuo da un'esperienza passata: qualcosa di affine alle celebri cellule della nonna.

Il riconoscimento dei volti nella corteccia IT si basa, quindi, su un insieme di circa 50 numeri in totale, che rappresentano la misurazione di un volto lungo un insieme di assi. E la scoperta di questo codice estremamente semplice per l'identità dei volti ha importanti implicazioni per la nostra comprensione della rappresentazione degli oggetti visivi. È possibile che il complesso della corteccia IT sia organizzato secondo gli stessi principi che regolano il sistema delle regioni dei volti, dove aggregati di neuroni codificano insiemi differenti di assi per rappresentare un oggetto. Attualmente stiamo facendo esperimenti per verificare questa teoria.

Una Stele di Rosetta neurale

Se mai vi capiterà di visitare il British Museum, a Londra, avrete modo di vedere quello stupefacente artefatto che è la Stele di Rosetta. Su di essa, lo stesso decreto di Menfi è inciso in tre lingue differenti: il geroglifico egiziano, il demotico e il greco antico. Poiché i filologi conoscevano il greco antico, poterono usare la Stele di Rosetta per decifrare i geroglifici egizi e il demotico. Analogamente, i volti, le regioni dei volti e la corteccia IT formano una Stele di Rosetta neurale, ancora in fase di decifrazione.

Mostrando figure di volti alle scimmie abbiamo scoperto regioni dei volti e compreso come le cellule all'interno di queste regioni li rivelano e li identificano. A sua volta, un giorno comprendere i principi di codifica nella rete delle regioni dei volti potrebbe portare alla comprensione dell'organizzazione dell'intera corteccia IT, rivelando il segreto di come viene codificata, più in generale, l'identità degli oggetti. Forse la corteccia IT contiene ulteriori reti specializzate nell'elaborazione di altri tipi di oggetti: una fabbrica vorticosa con molteplici catene di montaggio.

Mi auguro, poi, che conoscere il codice dell'identità dei volti esaudisca il mio sogno di studente, ovvero scoprire come immaginiamo le curve. Ora che comprendiamo le regioni dei volti possiamo iniziare ad addestrare gli animali a immaginare volti e a esplorare come l'attività neurale è plasmata dall'atto di immaginazione puramente interiore. E poi sorgono innumerevoli nuove domande. L'immaginazione riattiva il codice dei volti immaginati nelle regioni dei volti? E riattiva addirittura rappresentazioni precedenti di contorni e ombreggiature che forniscono i segnali al sistema delle regioni dei volti? Oggi abbiamo gli strumenti per indagare questioni del genere e per comprendere meglio come il cervello vede gli oggetti, reali o immaginati.

Poiché quasi tutti i comportamenti essenziali del cervello – la coscienza, la memoria visiva, la presa di decisioni, il linguaggio – richiedono interazioni con gli oggetti, una comprensione profonda della percezione degli oggetti ci permetterà di capire meglio l'intero cervello, non solo la corteccia visiva. Abbiamo appena iniziato a risolvere l'enigma del volto. ■

PER APPROFONDIRE

The Code for Facial Identity in the Primate Brain. Le C. e Tsao D.Y., in «Cell», Vol. 169, n. 6, pp. 1013-1028, 1° giugno 2017.

How Do We Recognize a Face? Quiroga R.Q., in «Cell», Vol. 169, n. 6, pp. 975-977, 1° giugno 2017.

I neuroni della nonna (reloaded). Quiroga R.Q., Fried I. e Koch C., in «Le Scienze» n. 536, aprile 2013.

FISIOLOGIA ANIMALE

Studi sulle anguille elettriche hanno portato a scoperte stupefacenti sul loro uso dell'elettricità, e su fisiologia e comportamento di questi animali

di Kenneth C. Catania

IN BREVE

Sappiamo da tempo che l'anguilla elettrica stordisce le prede. Ma il meccanismo di attacco e gli effetti della scossa sulla preda erano rimasti misteriosi.

Ora una serie di esperimenti di laboratorio ha rivelato come l'animale usa i campi elettrici per rilevare, seguire e immobilizzare la preda.

Inoltre, le anguille elettriche usano le proprie capacità elettriche quando sono minacciate, saltando fuori dall'acqua per aumentare l'intensità della corrente che trasmettono ai potenziali predatori.

Scosso dalle scosse

L'anguilla elettrica dispone di un superpotere che usa con grande efficacia sia per cacciare sia per difendersi.

Fotografia di David Liittschwager

Kenneth. C. Catania è professore di scienze biologiche alla Vanderbilt University. Studia neurobiologia comparata, e in particolare gli apparati sensoriali animali.

Non è un segreto che l'anguilla elettrica stordisca le sue prede; i resoconti su eventi del genere risalgono a secoli fa. Però, a meno di essere incaricati della sicurezza a bordo dell'astronave *Enterprise*, «stordire» è una parola piuttosto vaga.

Che cosa avviene effettivamente quando questi animali attaccano? Fino a poco tempo fa gli scienziati sapevano poco del superpotere dell'anguilla elettrica. Non avevo in programma di studiare il fenomeno, e certo non immaginavo di offrire un mio braccio a un'anguilla in nome della scienza, come alla fine ho fatto. Ma in qualità di professore di science biologiche alla Vanderbilt University affronto anche l'argomento dei pesci elettrici, e quando ho portato in laboratorio alcune anguille per ottenere foto e riprese al rallentatore con cui ravvivare la mia lezione, ho visto qualcosa di così strano da dover abbandonare tutto il resto per studiarle.

Quando un'anguilla elettrica attaccava un pesce con una scarica ad alta tensione, tutti i pesci che nella vasca si trovano nelle vicinanze diventavano immobili in 3 millisecondi. Come trasformati in statue, fluttuavano a mezz'acqua, fermi. All'inizio mi sono chiesto se semplicemente non fossero stati uccisi. Ma quando l'anguilla elettrica mancava il bersaglio e spegneva l'alta tensione, il pesce si riprendeva e fuggiva via alla massima velocità. L'effetto della scarica era temporaneo. Io però ero rimasto preso all'amo: dovevo capire come funziona l'attacco elettrico dell'anguilla.

L'analogia più ovvia che mi era venuta in mente era il taser usato dalla polizia, che causa paralisi a livello neuromuscolare interferendo con la capacità del sistema nervoso di controllare i muscoli. Il taser trasmette elettricità con un filo sotto forma di brevi impulsi ad alta tensione, alla frequenza di 19 impulsi al secondo. L'anguilla elettrica non ha bisogno di fili perché l'acqua permette il flusso della corrente, come avviene quando un asciugacapelli cade in una vasca da bagno. Per il resto, però, la scarica dell'anguilla elettrica ricorda in effetti quella del taser: una serie di brevi impulsi di appena 2 millisecondi circa. In una raffica di attacco un'anguilla può emettere oltre 400 impulsi al secondo: una frequenza assai più alta di quella dei dispositivi usati dalla polizia. Un'anguilla elettrica può essere una specie di super-taser acquatico?

Con questa domanda in testa mi sono impegnato in quella che sarebbe diventata una missione triennale grazie alla quale svelare i meccanismi dell'attacco dell'anguilla elettrica e gli effetti delle sue scosse sulle prede, e anche sui predatori che vorrebbero mangiarla. Ogni passaggio mi ha sorpreso per la raffinatezza con cui l'anguilla usa l'elettricità e mi ha ricordato che le invenzioni umane non reggono il confronto con le opere della natura.

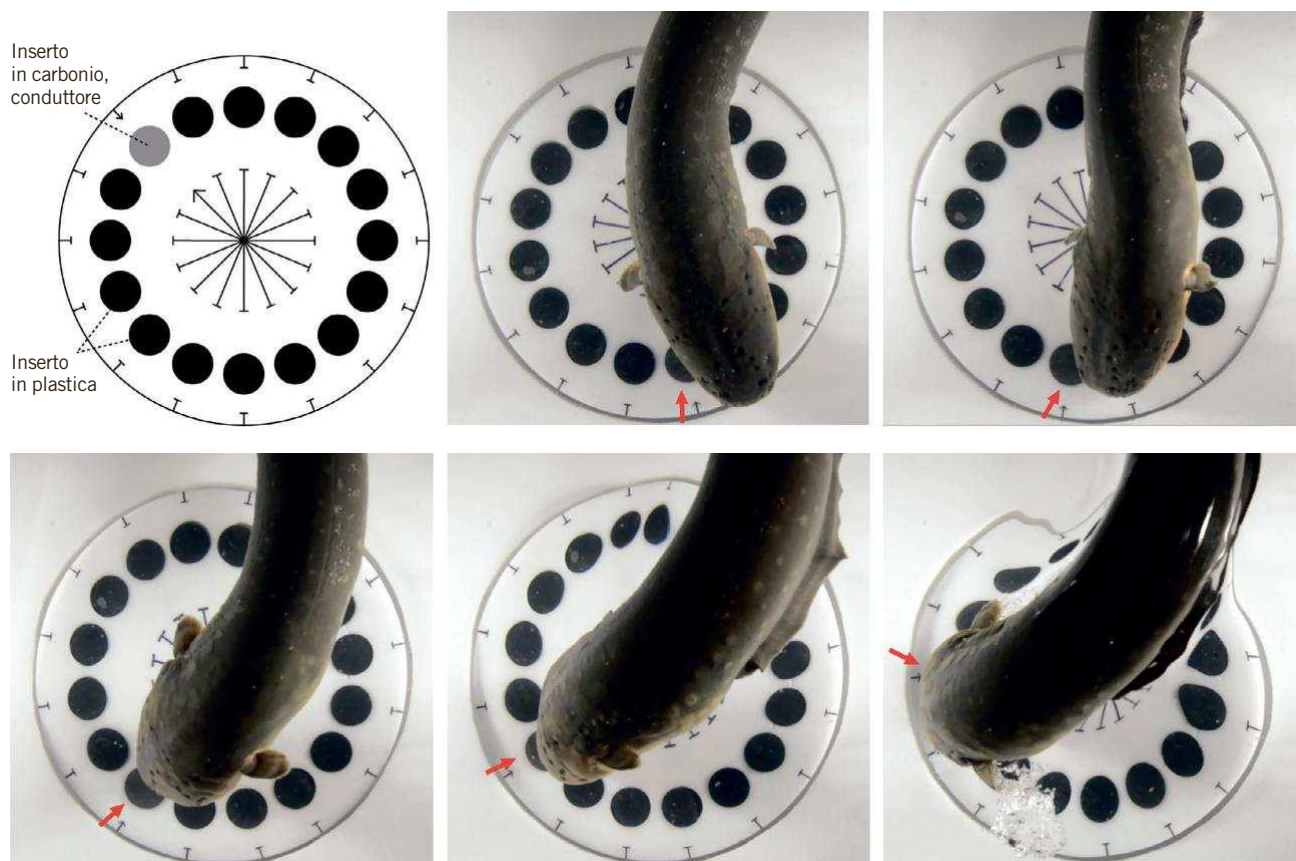
Una scossa potente

Potreste essere sorpresi nell'apprendere che l'anguilla elettrica non è una vera anguilla; appartiene invece a una famiglia di pesci nota come *Gymnotidae* che vive in Sud America. Gli altri membri di questo gruppo emettono deboli scariche elettriche per sondare l'ambiente e comunicare. La potenza dell'anguilla è aumentata nel corso dell'evoluzione. Può generare una differenza di potenziale pari anche a 600 volt, grazie a un organo elettrico che si estende per quasi tutta la lunghezza del suo corpo (può arrivare a 2,5 metri di lunghezza e quasi 20 chilogrammi di peso). L'organo è composto da migliaia di speciali cellule a forma di disco, chiamate elettrociti, che funzionano come batterie per scaricare elettricità.

Per verificare la possibilità che l'anguilla elettrica operi come un taser nel paralizzare la preda, avevo bisogno di osservare l'animale nella sua modalità di caccia. Quindi ho ideato un esperimento che approfitta dell'insaziabile appetito di questi pesci per i lombrichi. Inizialmente, ho messo un pesce morto, ma con nervi e muscoli ancora funzionanti, nell'acqua con l'anguilla (separati però da una barriera elettricamente permeabile), il pesce era collegato con un filo a un dispositivo che misurava le contrazioni muscolari. Poi ho nutrito l'anguilla con lombrichi, che era felice di colpire con una scossa e mangiare. Questo apparato mi ha permesso di effettuare una serie di test sulla risposta dei muscoli del pesce agli impulsi ad alta tensione provenienti dall'anguilla mentre caccia.

La raffica di impulsi ad alta tensione dell'anguilla elettrica ha scatenato intense contrazioni muscolari nel pesce, che cominciavano 3 millisecondi dopo l'inizio dell'attacco elettrico: esattamente lo stesso intervallo di tempo trascorso prima di vedere i pesci smettersi di muovere nei filmati al rallentatore. A quanto pare, l'anguilla elettrica ha inventato il taser assai prima degli esseri umani. Ma gli esperimenti hanno detto molto di più. L'anguilla non attiva direttamente i muscoli dei pesci: le sue scosse attivano invece i nervi che vanno ai muscoli dei pesci. Ogni impulso ad alta tensione dell'anguilla genera un potenziale d'azione, o impulso nervoso, nei nervi motori dei pesci.

Questa scoperta è notevole, se si pensa che l'organo elettrico dell'anguilla è un muscolo modificato attivato dai nervi motori dell'animale stesso. A loro volta, questi nervi motori sono attivati dai neuroni del suo cervello. Per ogni scossa, il flusso dei segnali di comando parte dal cervello dell'anguilla e viaggia fino ai suoi motoneuroni, che poi attivano l'organo elettrico. Da qui il segnale passa attraverso l'acqua e fa scattare prima i motoneuroni e poi i muscoli dei pesci circostanti. In altre parole, l'anguilla elettrica immobilizza la preda mediante una sorta controllo a distanza, un telecomando ad alte prestazioni.

Queste considerazioni suggeriscono che l'emissione elettrica dell'anguilla potrebbe essere stata plasmata in parte da quello che accade ai muscoli della preda; con questa ipotesi in mente, ho iniziato a considerare da un'altra prospettiva le raffiche ad alta tensio-

Sistema di tracciamento. L'anguilla elettrica rileva e raggiunge la preda e altri conduttori usando l'elettroricezione ad alta tensione. In esperimenti effettuati con un disco rotante su cui era stato inserito un conduttore e vari altri materiali non conduttori, l'anguilla era in grado di individuare il conduttore con notevole precisione.

Kenneth C. Catania

ne dell'anguilla. In particolare mi hanno incuriosito i resoconti di un ricercatore, Richard Bauer, che nel 1977 mostrò che spesso durante la caccia le anguille elettriche si fermano ed emettono una coppia di impulsi ad alta tensione, separati di 2 millisecondi. Questi impulsi accoppiati sono detti doppietti, e tutte le anguille elettriche del mio laboratorio hanno esibito questo comportamento. Così mi sono chiesto: a che servono i doppietti?

Approfondendo la fisiologia dei muscoli ho visto che i doppietti – che possono anche essere visti come coppie di potenziali d'azione – inviati dai motoneuroni ai muscoli sono il modo più efficace per generare una tensione muscolare massima. I miei esperimenti hanno mostrato che i doppietti emessi dall'anguilla elettrica provocano una breve ma potente contorsione spasmodica di tutto il corpo delle prede vicine, contrariamente alle raffiche, che causano una paralisi di una certa durata. Lo spasmo, a sua volta, produce un forte spostamento d'acqua: in sostanza, un rumore subacqueo. Data la squisita sensibilità delle anguille elettriche ai minimi movimenti dell'acqua, viene in mente un'interessante possibilità. Forse per l'anguilla elettrica i doppietti sono un modo per domandare: «Sei vivo?». Dopotutto, in natura l'anguilla elettrica caccia di notte nel Rio delle Amazzoni, circondata da un vasto assortimento di prede nascoste e assai più difficili da trovare dei lombrichi e pesci rossi gettati dentro la vasca.

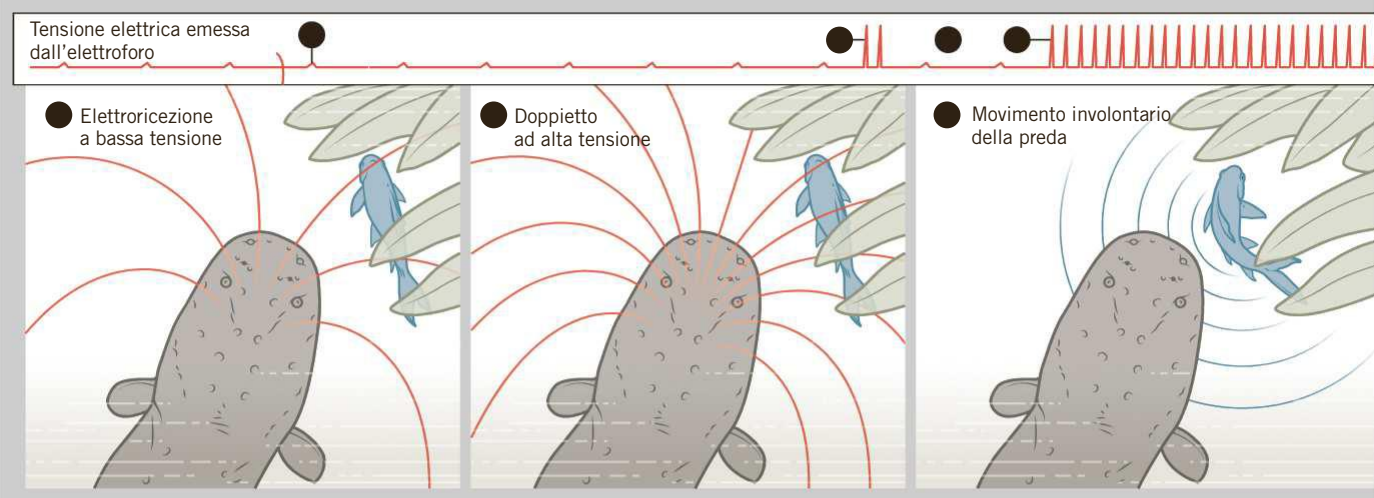
A conferma dell'idea, quando nel mio laboratorio le anguille hanno dato la caccia a nuove prede, come gamberi d'acqua dolce o animali nascosti tra le piante della vasca, spesso hanno emesso doppietti durante la ricerca e hanno attaccato dopo lo spasmo della preda, come se il movimento della preda avesse dato loro una dritta. Era già una buona indicazione, ma per ottenere prove più dirette ho collegato il pesce morto a uno stimolatore elettrico, che poteva essere attivato sia da me sia dai doppietti dell'anguilla. Poi ho chiuso il pesce collegato ai fili in un sacchetto di plastica chiuso con una cerniera, in modo che i doppietti non potessero agire su di esso; questa configurazione mi ha permesso di controllare quando si contraevano i muscoli del pesce. In effetti, le anguille elettriche non hanno mai fatto seguire un attacco a un doppietto se non quando il pesce si è contratto. Gli esperimenti hanno dimostrato che l'anguilla attacca in risposta ai movimenti dei pesci dovuti al doppietto.

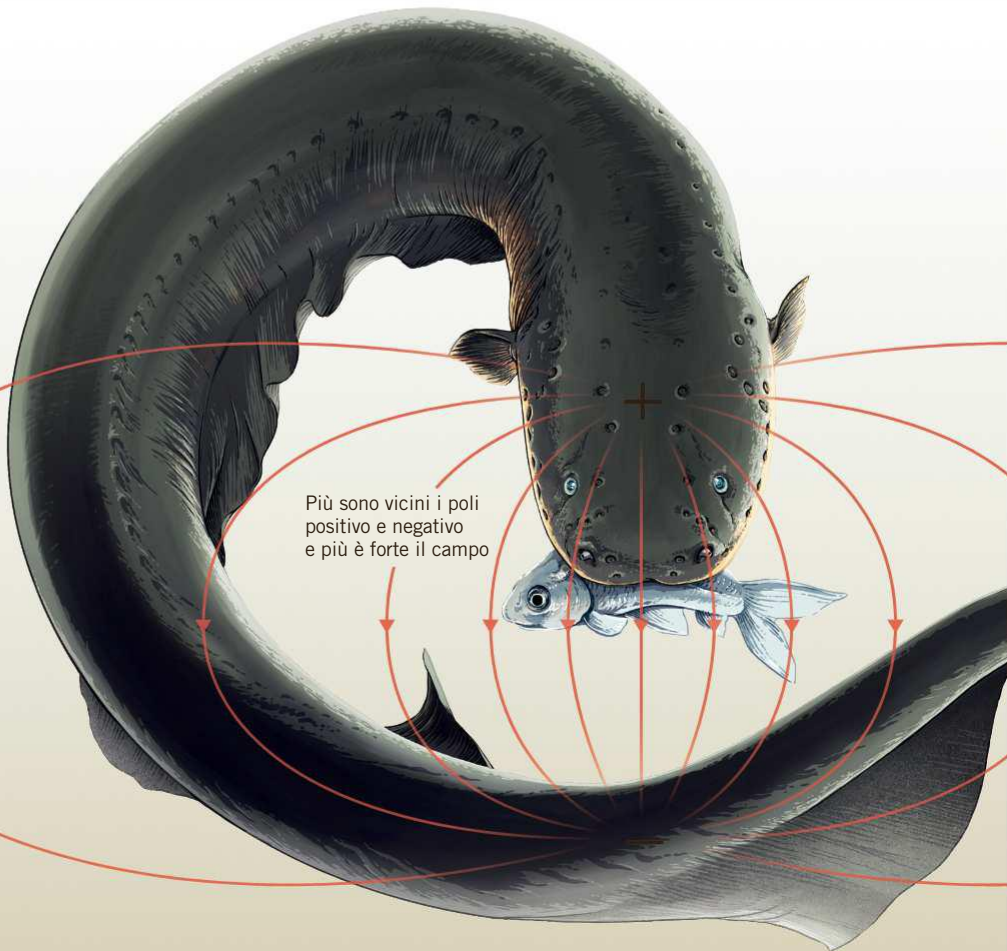
Il «telecomando» dell'anguilla elettrica, insomma, può funzionare in due modalità, che insieme permettono una delle strategie di caccia più insidiose di tutto il regno animale: può smascherare le prede nascoste facendole muovere e paralizzare le prede in movimento una volta scoperte.

Curva e raddoppia

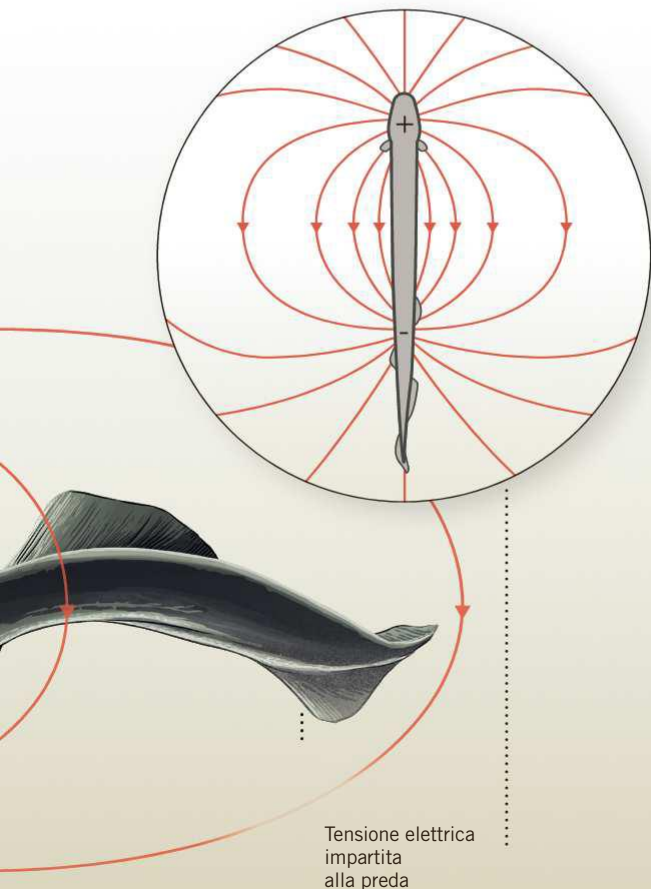
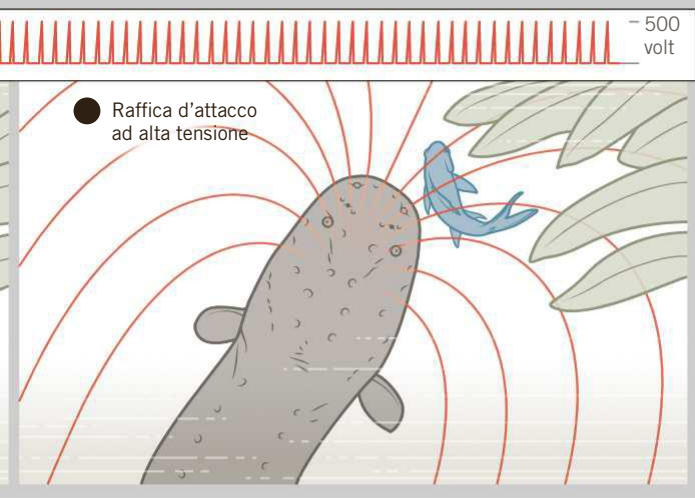
Controllare a distanza altri animali è un gran bel trucco, ma non è l'unico, per l'anguilla elettrica. In più, questo animale ha un'ingegnosa soluzione per un problema di fondo delle sue scariche elettriche. Maghi e supereroi possono indirizzare i propri fulmini dove vogliono, ma ogni volta che un'anguilla emette un impulso ad alta tensione, l'elettricità si distribuisce nell'acqua circostante. Co-

Modalità: attacco!

Come un taser, un'anguilla elettrica che caccia emette impulsi elettrici per immobilizzare la preda. La scossa attiva i motoneuroni che controllano i muscoli della preda. Si può così dire che l'anguilla elettrica riesce a controllare la preda a distanza. Il controllo è usato in due modi: per rilevare prede nascoste costringendole a contrarre il corpo e poi per paralizzarle una volta localizzate, impedendone la fuga. L'anguilla inoltre può usare le proprie emissioni elettriche per seguire i movimenti della preda. E ha evoluto una soluzione ingegnosa per una difficoltà di fondo dovuta all'ambiente acquatico, in cui tipicamente molta elettricità delle sue scosse si disperde nell'acqua circostante.

Intensità concentrata

In termini fisici, il campo elettrico dell'anguilla elettrica è un dipolo. Le linee che rappresentano le forze esercitate su una carica positiva hanno origine dalla testa, positiva, e terminano sulla coda, negativa. La densità delle linee indica la forza del campo in ogni punto considerato. Avvicinare il polo positivo al polo negativo aumenta l'intensità del campo tra i poli. È quello che fa l'anguilla quando curva la coda attorno alla preda che tiene in bocca prima di darle la scossa.

Illustrazioni di Matthew Twombly
Fonti: *Electric Eels Concentrate Their Electric Field To Induce Involuntary Fatigue In Struggling Prey*, di Kenneth C. Catania, in «Current Biology», Vol. 25, n. 22, 16 novembre 2015, e *The Shocking Predatory Strike Of The Electric Eel*, di Kenneth Catania, in «Science», Vol. 346, 5 dicembre 2014.

Le fasi della caccia

L'anguilla elettrica usa impulsi sia a bassa sia ad alta tensione per esplorare l'ambiente circostante 1. Nel cercare prede nascoste tra le piante, emette coppie di impulsi ad alta tensione, chiamati doppietti, che provocano violenti spasmi nelle prede vicine 2. Lo spostamento d'acqua prodotto dallo spasmo rivela la presenza della preda 3. Individuato il bersaglio, l'anguilla elettrica scarica una raffica d'attacco ad alta tensione che paralizza la preda, che subito dopo è morsa e risucchiata nella bocca.

me risultato, solo una piccola frazione della straordinaria potenza dell'anguilla è trasmessa alla preda. Il fisico e chimico britannico Michael Faraday, che per coincidenza lavorò sulle anguille elettriche nel 1838, ci ha dato un buon modo per visualizzare il problema. Il campo elettrico dell'anguilla è detto dipolo, con le linee che rappresentano le forze su una carica positiva che vanno dalla testa dell'animale, positiva, e alla coda, negativa. La densità delle linee riflette la forza del campo elettrico in ogni dato punto: è massima ai poli e diminuisce rapidamente con la distanza. Nei corsi introduttivi di fisica si impara che avvicinando fra loro i due poli, si aumenta fortemente l'intensità del campo compreso fra di essi. Verrebbe da dire che le anguille elettriche abbiano studiato fisica, perché è proprio questo che fanno con le prede difficili che continuano a muoversi. Afferrata saldamente la vittima fra le mascelle, l'anguilla curva la coda (il polo negativo) attorno a essa prima di inviarle una serie di raffiche ad altra tensione.

Per misurare l'effetto della manovra ho realizzato una sorta di «giocattolo da mordere» per anguille elettriche: una coppia di elettrodi di registrazione su un supporto di plastica inserito in un pesce morto. L'anguilla mordeva l'apparato, e io agitavo i fili di collegamento per simulare una lotta. L'anguilla si incurvava e dava la scossa agli elettrodi. Come atteso, l'intensità del campo elettrico è più che raddoppiata. È un'ottima strategia, che permette all'anguilla di concentrare la potenza emessa, che di per sé è fissa, su un bersaglio ben preciso, come quando si focalizza la luce di una torcia elettrica in un unico punto brillante.

Quello che è accaduto alla preda era prevedibile, ma comunque impressionante. Esperimenti successivi hanno mostrato che l'attacco così amplificato provoca contrazioni muscolari di frequenza insolitamente elevata, che sfiancano totalmente la preda nel giro di qualche secondo. È l'analogo elettrico di una neurotossina, e permette all'anguilla di catturare e sopraffare animali che altrimenti sarebbero pericolosi, come un grosso gambero di fiume con le sue chele.

Non solo un'arma

Studiando il comportamento di caccia dell'anguilla elettrica ho notato una cosa che mi ha fatto domandare se la scossa non potesse essere qualcosa di più di un'arma. Quando le anguille vanno all'attacco, in genere succedono tre cose. Prima emettono una raffica di impulsi ad alta tensione, poi si lanciano sulla preda e infine la risucchiano nella bocca. Nei miei esperimenti, però, se facevo contrarre il pesce morto nel sacchetto di plastica, l'attacco finiva sempre prematuramente. L'anguilla emetteva la raffica ad alta tensione e si lanciava verso il pesce, ma lo mancava e interrompeva l'attacco senza mordere e risucchiare in bocca la preda. Perché?

Avevo dato per scontato che l'attacco fosse un evento pianificato che si svolgeva senza *feedback* sensoriali. Poi però mi è venuto in mente che le anguille potevano usare gli impulsi ad alta tensione come sistema di puntamento. Questo avrebbe spiegato come mai trascuravano le prede isolate dalla plastica. Le anguille elettriche si sono evolute a partire da pesci elettrici (o elettrofori) assai più deboli che usano l'elettricità per sondare l'ambiente, e hanno mantenuto la capacità di emettere deboli impulsi a bassa tensione per questo scopo. Perché non usare anche l'alta tensione per un fine simile? Così ho deciso di testare questa possibilità.

Ho sfruttato le proprietà conduttrici delle prede e l'aggressivo comportamento di caccia dell'anguilla. Gli animali sommersi tendono a essere più conduttivi dell'acqua, quindi l'anguilla elettrica è interessata soprattutto ai conduttori perché hanno la «firma» de-

gli esseri viventi. Ricordiamo però che l'anguilla può rilevare, e in effetti rileva, i conduttori con il suo sistema a bassa tensione, che è sempre attivo fino a quando non passa al sistema ad alta tensione per l'attacco. Per testare in modo specifico l'esistenza dell'elettroricezione ad alta tensione dovevo esaminare al rallentatore il comportamento delle anguille mentre colpiscono, quando il sistema a bassa tensione è spento ed è attivo solo quello ad alta tensione.

Il primo semplice esperimento è consistito nell'aggiungere nell'acquario una barretta di carbonio, un conduttore inerte, accanto al pesce che si contorceva nel sacchetto di plastica. Ancora una volta l'anguilla ha attaccato quando ha rilevato il movimento dell'acqua dovuto allo spasmo del pesce e si è diretta verso il sacchetto. Questa volta, però, a metà strada ha cambiato direzione e ha cercato di mangiare la barretta di carbonio, addentandola e risucchiandola in bocca. L'anguilla sembrava aver preso la barretta di carbonio per il pesce, come ci si attenderebbe dall'uso degli impulsi ad alta tensione per rintracciare la preda.

Era un buon inizio, ma avevo bisogno di più prove. Ho sviluppato ulteriori test, con una barretta di carbonio in mezzo a varie barrette di plastica per controllare che non fosse in gioco il senso della vista. Ogni volta l'anguilla attaccava il conduttore di carbonio mentre emetteva raffiche ad alta tensione. Il test definitivo è consistito nel mostrare alle anguille un disco in rapida rotazione sulla cui superficie era stato inserito un unico piccolo conduttore insieme a una serie di oggetti non conduttori di identico aspetto come controllo. Il loro comportamento era incredibile: riuscivano a seguire e attaccare il conduttore durante la raffica ad alta tensione con una velocità e una precisione mai viste negli animali che sfruttano l'elettroricezione in modo attivo.

Non c'era dubbio: l'anguilla elettrica usa simultaneamente l'alta tensione come arma e come parte del sistema sensoriale di rilevamento della preda. Il mio rispetto per questi animali cresceva ogni giorno. Ed era un bene, perché il trucco successivo sarebbe stato indirizzato al sottoscritto.

Una difesa fulminante

Nel marzo 1800, il naturalista prussiano Alexander von Humboldt assoldò gli abitanti di un villaggio dell'Amazzonia affinché raccogliessero anguille elettriche per i suoi esperimenti. Il risultato fu degno di un racconto epico. Per pescare le anguille decisero di servirsi di cavalli selvatici e muli; ne misero insieme 30 e li costrinsero a entrare in una pozza poco profonda piena di questi pesci, che vennero fuori dal fango per attaccare gli equini con ripetute scosse elettriche. Gridando e agitando rami d'albero, gli abitanti del villaggio forzarono gli atterriti cavalli a rimanere nella pozza fino a che le anguille non esaurirono le forze e poterono essere catturate senza pericolo. Nella confusione morirono due dei cavalli e altri uscirono a fatica dalla pozza e crollarono sulla riva. Nel 1807 Humboldt pubblicò un resoconto di quello spettacolo, che contribuì alla sua fama. In seguito però alcuni scienziati misero in dubbio questa storia. Perché mai le anguille avrebbero corso il grave rischio di attaccare grossi animali che non potevano mangiare? Per oltre 200 anni non sono stati riferiti altri comportamenti simili, fino a quando nel mio laboratorio non ho usato la rete sbagliata per prendere una grossa anguilla.

Di norma le anguille elettriche non saltano fuori dalle loro vasche. Ma c'è un'eccezione: se ci si avvicina a un'anguilla bloccata in un angolo con un grosso conduttore che sporge fuori dall'acqua, spesso la sua risposta è un attacco esplosivo. Ho scoperto questo comportamento, e ne sono rimasto letteralmente scosso, quando ho provato a trasferire un grosso esemplare da un acquario a un altro servendomi di una rete con manico e bordo metallico. In un istante l'anguilla si è voltata ed è balzata fuori dall'acqua premendo la mascella inferiore contro il manico metallico e lanciando una lunga raffica di impulsi ad alta tensione (per fortuna indossavo guanti protettivi di gomma). Si tratta di un comportamento di difesa fortemente dissuasivo esibito da tutti gli esemplari che ho messo alla prova.

Durante le mie indagini sulle conseguenze elettriche del balzo dell'anguilla e sul resoconto dell'avventura di Humboldt, molti pezzi di questo puzzle biologico e storico sono andati al loro posto. Se l'anguilla elettrica interpreta un conduttore di piccole dimensioni come una preda commestibile, ne segue che un grosso conduttore semisommerso in avvicinamento sarebbe interpretato come un animale grosso e minaccioso, come un predatore felino o un coccodrillo. Allontanarsi a nuoto? In Amazzonia, nella stagione secca le anguille elettriche si ritrovano spesso intrappolate in pozze ristrette, dove sono a rischio di predazione: proprio la situazione di cui parla Humboldt. Aggiungendo a questo scenario il fatto che l'anguilla non può «puntare» la sua elettricità quando è sommersa, abbiamo tutti gli ingredienti affinché si evolva una stupefacente strategia difensiva.

Dunque il tumultuoso episodio narrato da Humboldt è avvenuto davvero? Anche se il suo famoso resoconto non dà molti dettagli, sono riuscito a trovare un'illustrazione poco nota di quell'evento, apparsa decenni più tardi in un libro di Robert Schomburgk, esploratore britannico e conoscente di Humboldt. La figura centrale è un cavallo fulminato da un'anguilla saltata fuori dall'acqua per premere la mascella inferiore sul petto dell'equino: la medesima immagine delle anguille elettriche del mio laboratorio quando saltano fuori dalla vasca. Per quanto mi riguarda, se Humboldt avesse detto di aver trovato dinosauri in Amazzonia, sarei per andare a controllare.

E c'è dell'altro

Ci sono cose difficili da spiegare all'ufficio acquisti dell'università, e le braccia mozzate di zombie sono senz'altro tra queste. Dunque mi è parso il caso di usare i miei soldi quando mi è servito qualche braccio finto per una serie di esperimenti con le anguil-

DISSUASIONE ELETTRICA

La miglior difesa

Quando percepiscono un pericolo, le anguille elettriche balzano fuori dall'acqua e danno la scossa. Per misurare la corrente che attraversa un corpo umano nel corso dell'attacco di un'anguilla in queste circostanze l'autore ha effettuato un esperimento in cui ha offerto a una giovane anguilla il suo stesso braccio ❶. Quando il pesce emerge dall'acqua, al posto del normale cammino della corrente dalla sua testa alla coda si stabilisce un cammino che passa per il bersaglio, e la corrente si intensifica ❷. Al culmine del balzo, la corrente trasmessa al bersaglio era di circa 43 milliampere: una scossa fortemente dissuasiva a cui l'autore ha reagito di riflesso ritraendo il braccio ❸. Una grande anguilla trasmetterebbe al bersaglio una scossa nettamente più potente.

Fonte: *Power Transfer To A Human During An Electric Eel's Shocking Leap*, di Kenneth C. Catania, in «Current Biology», Vol. 27, n. 18, pp. 2887–2891, 25 Settembre 2017.

le mirati a chiarire ulteriormente il loro comportamento caratterizzato dai balzi fuori dall'acqua. Dopo aver ripulito le braccia dal sangue (finto), le ho riempite di diodi emettitori di luce collocati in modo strategico a simulare il decorso dei nervi e le ho offerte alle anguille. L'avvicinamento di un braccio a un'anguilla portava a una convincente dimostrazione del comportamento di difesa. I lampi di luce erano tanto più intensi quanto più le anguille saltavano oltre la superficie dell'acqua per trasmettere la scossa al braccio. Ma come, e perché?

Per rispondere bisognava ricavare il cosiddetto circuito equivalente e poi determinare la tensione, o forza elettromotrice, dell'organo elettrico del pesce. Dovevo anche calcolare di quanto i materiali del circuito riducono il flusso della corrente che li attraversa, cioè la loro resistenza elettrica. Quindi ho organizzato esperimenti con cui misurare le variabili una alla volta, cominciando dall'organo elettrico dell'anguilla. Lunga poco meno di un metro, l'anguilla più grossa che avevo in laboratorio aveva un potenziale di 382 volt e una resistenza interna di appena 450 ohm, il che permette, in assenza di altre resistenze, una corrente di quasi 1 ampere. Una gran scossa elettrica, molto più potente di quella di un taser.

Quando un'anguilla elettrica emerge dall'acqua e preme la mascella inferiore su un bersaglio, il normale cammino dell'elettricità che va dalla testa alla coda attraverso l'acqua viene progressivamente interrotto – l'aria è un cattivo conduttore – per essere sostituito da un cammino che attraversa il bersaglio stesso. Somiglia quasi a un cursore del volume: più esce dall'acqua, più l'anguilla «alza il volume» della scossa che attraversa il bersaglio. Questa osservazione spiega come questo comportamento potrebbe essersi evoluto gradualmente, perché ogni aumento dell'altezza del balzo dà un certo vantaggio. Ma quanto è efficiente l'anguilla nell'alzare il volume?

Nel chiarire i dettagli, mi sono imbattuto nel più fondamentale dei problemi circuitali: calcolare la corrente elettrica in un circuito con due resistori affiancati. In particolare è un problema tipico degli esami di fisica, perché non si può calcolare la corrente nel circuito senza conoscere il valore di entrambi i resistori. Io ero in grado di risolvere l'equazione per una resistenza – il cammino dalla testa dell'animale all'acqua – effettuando misurazioni da anguille che attaccano placche metalliche collegate a un voltametro. L'altro resistore era il braccio, il bersaglio dell'anguilla. Raccolti i dati su tutte le altre variabili, potevo fare solo delle ipotesi su quest'ultimo valore: la complessa resistenza che si sviluppa tra la mascella dell'anguilla, un bersaglio vivo e l'acqua circostante.

Era dura smettere di lavorare sul circuito senza essere arrivato alle ultime risposte. Per di più nel 2016, proprio mentre usciva il mio primo lavoro che documentava i balzi d'attacco dell'anguilla, su Internet è stato pubblicato un video di un'anguilla elettrica particolarmente grande che balzava addosso a uno stupefatto pescatore in Sud America (l'uomo, temporaneamente immobilizzato, si è poi ripreso, come dopo la scarica di un taser). Di colpo, il circuito che studiavo per curiosità aveva conseguenze nel mondo reale.

L'unica possibilità era usare il mio stesso braccio per determinare l'ultima variabile e verificare le previsioni derivanti da tutte le misurazioni precedenti. Ho usato un'anguilla elettrica molto piccola, con una forza elettromotrice di 198 volt e una resistenza interna di 960 ohm. Ho costruito un dispositivo per misurare la corrente che attraversava il mio braccio durante l'attacco dell'anguilla, e finalmente ho potuto risolvere il circuito. E posso aggiungere con convinzione che le anguille elettriche riescono ad alzare il volume dell'attacco con grande efficienza.

Ho dato inizio a questo progetto pensando di insegnare qualcosa sulle anguille elettriche, ma alla fine sono state loro a insegnarmi qualcosa. E ogni volta che studio un'altra specie la lezione è sempre la stessa: gli animali sono sempre molto più interessanti di quanto immaginavo, in modi che all'inizio non avrei potuto prevedere. È una cosa che mi tiene sveglio la notte – in senso buono – a pensare a tutto quello che c'è ancora da scoprire. ■

PER APPROFONDIRE

The Shocking Predatory Strike of the Electric Eel. Catania K., in «Science», Vol. 346, pp. 1231-1234, 5 dicembre 2014.

Electric Eels Use High-Voltage to Track Fast-Moving Prey. Catania K., in «Nature Communications», Vol. 6, articolo n. 8638, 20 ottobre 2015.

Power Transfer to a Human during an Electric Eel's Shocking Leap. Catania K.C., in «Current Biology», Vol. 27, n. 18, pp. 2887-2891, 25 settembre 2017.

Natural Born Killer. Catania K.C., in «Le Scienze» n. 514, giugno 2011.

STORIA DELLA MEDICINA

Il fantasma dello scorbuto

Tra il Cinquecento e il Settecento questa malattia falcidiò gli equipaggi delle navi che rimanevano mesi in mare per esplorare nuove terre e inaugurare rotte commerciali, senza che nessuno riuscisse a identificarne la vera causa

di Arnaldo D'Amico

La bordata a salve scuote il *Gallardo*, galeone della marina militare spagnola. È il 25 luglio 1770, Oceano Pacifico, emisfero sud, Tropico del Capricorno, a una decina di miglia la costa del Sud America. Il boato e poi il fumo svaniscono, ma dal brigantino, anch'esso con le insegne della Spagna, nessuna reazione. Prima i segnali con le bandiere, i richiami dei marinai e infine le cannonate: le vele ancora in bando, il timone che oscilla indolente con il rollio, nessuno lungo i bordi, sui castelli di prua e di poppa.

Arnaldo D'Amico, neurologo clinico e ricercatore per 12 anni, poi al quotidiano «la Repubblica». Quando può sta in un laboratorio (Life Science a Berkeley, Sloan Kettering a New York, Harvard a Boston) a vedere come si fanno le scoperte.

L'*Oriflama*, un brigantino di 42 metri, 26 cannoni e 1500 tonnellate di stazza, con a bordo 176 marinai, 38 passeggeri e 628 tonnellate di beni di lusso (8 milioni di euro il valore attuale) destinati al viceré del Perù, è alla deriva, ormai non vi sono dubbi.

Scomparire e ricomparire

Brigantino e galeone erano salpati da Cadice, nel sud-ovest della Spagna, diretti a Valparaíso, in Cile, il 17 febbraio 1770, perdendosi di vista e ritrovandosi ogni volta. Succedeva quando il *Gallardo* (galante, in italiano), la nave scorta armata con 70 cannoni, approdava per rifornirsi di acqua e cibo fresco, mentre per ordine del re Carlo III l'*Oriflama* (fiamma dorata) doveva proseguire, usando le abbondanti provviste imbarcate, evitando porti e spie dei pirati che vi girano per non mettere a repentaglio il prezioso carico. Ma dopo la tempesta di Capo Horn, estremo meridionale del continente americano, non si erano più ritrovati, e da due mesi il *Gallardo* cercava l'*Oriflama* lungo le coste pacifiche del Sud America.

Juan Esteban de Ezpeleta, capitano del galeone, ha di fronte poche possibilità. La peggiore: il brigantino è una trappola. Conquistato dai pirati, eliminato l'equipaggio, ora stanno in agguato. Non a caso Esteban non si avvicina. Oppure è un vascello fantasma, i marinai buttati in mare, depredato e poi lasciato alla deriva. Ultima ipotesi, epidemie o scorbuto, se non ambedue, hanno stroncato uno dopo l'altro gli uomini: una bara galleggiante, oltre che uno spettro. Come nel 1620, nel 1630 e nel 1657, tutti velieri della Galeon de Manila, la linea marittima del Pacifico tra le Filippine e il Messico, dove via terra si raggiungeva la costa atlantica per salpare verso la Spagna. E anche nell'Atlantico non erano mancati i velieri fantasma per lo scorbuto, come quello trovato nel 1577 a girare in cerchio nel Mar dei Sargassi, la foresta galleggiante in perenne rotazione tra Cuba e le Bermuda per l'incrocio delle correnti marine. Tutti ritrovati così, alla deriva, e i pochi superstiti, se c'erano, agonizzanti. Ma si alza il vento, il cielo si annuvola, non si può più aspettare, il capitano manda una lancia con un ufficiale e due marinai.

Tornato sul *Gallardo*, l'ufficiale conferma l'ultima ipotesi: 106 sopravvissuti dei quali solo 30 ancora in grado di parlare e, fino a qualche giorno prima, di manovrare le vele più basse dal ponte, ma troppo deboli per salire sugli alberi. Gli altri 78 in un sacco, un tonfo nella scia della nave, giorno dopo giorno. Peste grigia, come allora chiamavano lo scorbuto. I marinai dell'epoca lo riconoscevano: è l'unica malattia che lascia senza denti, con le gengive infiammate e doloranti. E se da masticare vi sono solo gallette e carne secca mentre il rum brucia in bocca, la fame dà il colpo di grazia.

Esteban decide di mandare alcuni marinai sull'*Oriflama* per rimetterlo in navigazione. Ma la tempesta si scatena, impossibile raggiungere il brigantino, che viene trascinato via dal vento. Dai superstiti a bordo, nessun segnale. La lanterna di poppa inghiottita dalla nebbia è l'ultima cosa che vedono del *Gallardo*. Inutili le ricerche. Identificato grazie ai documenti di bordo e parte del carico recuperato, il brigantino sarà ritrovato il 9 maggio 2008 sepolto nella sconfinata spiaggia di Las Trincheras, 300 chilometri a sud di Valparaíso, in Cile, davanti al ristorante vista mare che da allora si chiama *Oriflama*.

Infuso vitaminico

Dalla costa pacifica del Nuovo Mondo a quella atlantica, poi 8000 chilometri a nord, dove il fiume San Lorenzo diventa un fiordo stretto e lungo verso l'oceano. Sulla riva ovest del fiume si affaccia Quebec City, capitale dell'omonima provincia del Canada. Si chiamava Stadacona due secoli prima del naufragio dell'*Oriflama*, ed era un villaggio della tribù degli Irochesi, con 500 indigeni. Qui Jacques Cartier, al comando di tre velieri francesi, getta l'ancora il 7 settembre 1535. La latitudine è quella di Saint-Malo, città della Bretagna dal clima mite da cui erano salpati in primavera. Meglio passare l'inverno in queste acque placide, vicine a un *kanaka* («villaggio», in lingua irochese, da cui verrà Canada) dove reperire acqua e viveri. Ma qui l'inverno è un'altra cosa. Dopo poche settimane raffiche di aria polare trasformano l'acqua e la terra in una distesa bianca accecante. A bordo le provviste non mancano, ma niente verdure. Tre mesi dopo 25 marinai sono accatastati nella stiva, morti. La metà dei sopravvissuti «è debole e vicina alla morte», scrive Cartier sul giornale di bordo. «Le loro gengive si gonfiano e diventano rosse. Un orrendo fetore esce dalle loro bocche spalancate. Una terribile peste sta scendendo su di loro».

Intanto nel villaggio un'epidemia ha ucciso 50 dei 500 abitanti. Gli indiani sono terrorizzati dalla malattia sconosciuta. Vaiolo, forse, o più probabilmente morbillo, data la bassa mortalità, di sicuro portato dai francesi perché questi virus non esistevano nel continente americano, gli stessi che pochi anni prima hanno sterminato a sud i Maya permettendo a Hernán Cortés di conquistare l'America centrale con 500 uomini. Ma batteri, virus, sistema immunitario e la maggiore vulnerabilità a microbi con cui non si è mai venuti a contatto sono conoscenze molto al di là da venire. Mentre bisogna attendere i tempi dell'*Oriflama* per capire che lo scorbuto è una malattia a se stante.

Così i francesi si convincono di essere stati contagiati dagli indiani. Il problema comune induce scambi di informazioni e di visite. Gli indiani, privati di verdura fresca a ogni inverno lungo e gelido, offrono ai francesi il loro rimedio: un tè (infuso di acqua calda ma non bollente) a base di corteccia e foglie di una conifera (probabilmente *Thuja occidentalis*) da bere in abbondanza, ogni giorno. In

IN BREVE

Lo scorbuto è una malattia causata da un apporto insufficiente o assente di vitamina C, l'acido ascorbico, nella dieta quotidiana.

Tra il XVI e il XVIII secolo, lo scorbuto limitò l'esplorazione del mondo e l'apertura di vie commerciali marittime, con effetti geopolitici ed economici: durante i mesi di navigazione, gli equipaggi non potevano contare su vegetali freschi, fonti di vitamina C.

Per lungo tempo però l'arrivo dello scorbuto sulle navi fu attribuito alle cause più diverse, dai miasmi alle punizioni divine. La svolta si ebbe a metà del Settecento, grazie allo studio di un medico militare britannico che illustrò i benefici del succo di limone sulla malattia.

Fabbrica di spremute. In questa incisione del XIX secolo, una piccola fabbrica per la produzione di succo di limone, fondamentale per la sconfitta dello scorbuto sulle navi che solcano i mari per mesi e mesi.

Universal History Archive/UIG/Getty Images; Grafissimo/iStock (*pagine successive*)

seguito si scoprì che 100 grammi di foglie di questa ed altre conifere contengono circa 50 milligrammi di vitamina C (la dose quotidiana consigliata oggi è di 45 milligrammi). E che il tipo di preparazione conserva parte dell'acido ascorbico (nome chimico della vitamina C) che invece verrebbe distrutto dalla bollitura. I marinai sopravvissuti guariscono e Cartier, costruito un traliccio di tronchi su cui issa la bandiera francese, prende possesso di quelle terre e salpa il 6 maggio, abbandonando uno dei velieri, *Piccola Hermine*, per mancanza di uomini. Attracca a Saint-Malo il 16 luglio 1536. Sbarcano anche dieci Irochesi che, tranne uno, moriranno di infezioni varie.

Una patologia complicata

Cartier scoprì la cura, ma non la malattia. Era «un'infezione presa dagli indiani», e il tè aveva guarito quella malattia. Non lo scorbuto che, ripercorrendo giornali di bordo, relazioni dei medici imbarcati, racconti degli equipaggi e registri delle marine militari alla luce di quello che sappiamo oggi sui sintomi, continuò a uccidere marinai, soldati imbarcati, passeggeri e schiavi dieci volte di più che tempeste e naufragi, battaglie, arrembaggi, affondamenti, peste, tifo, vaiolo e colera, tutti messi insieme nel corso dell'era della vela. Tre secoli in cui lo scorbuto ferma esploratori e conquistatori, navi mercantili e flotte militari, favorendo concorrenti e nemici, per puro caso rimasti indenni o meno colpiti. Tre secoli in cui negli oceani è stato deciso il mondo com'è oggi. Ci volle la diffusione del vapore dalla metà dell'Ottocento, che abbatté i tempi di percorrenza in mare aperto sotto quei 2-3 mesi di mancanza di vegetali freschi in cui arriva lo scorbuto, per farlo sbarcare dalle navi.

Individuare questa malattia, distinguerla dalle altre, non fu facile. Non lo è nemmeno ai giorni nostri, in cui i pochi casi si verificano in persone con disordini alimentari da patologie mentali o comportamenti anomali.

Come il caso scoperto in California nel 1984. Una donna di 48 anni soffre di malesseri vari, dolori addominali ed emorragie interne da sette anni. Per fermarle subisce cinque interventi chirurgici, tutti inutili. Finalmente un medico le chiede che cosa mangia e la guarisce con la vitamina C. Scopre che non consuma né frutta né verdura. Dei prodotti industriali di cui si nutre, per puro caso evita o cuoce quelli in cui vi sono gli additivi alimentari con le sigle da E300 a E304, indicative dell'acido ascorbico in diverse formulazioni chimiche. Viene aggiunto perché è un ottimo antiossidante, e quindi conservante, innocuo ed economico. È l'acido ascorbico del succo di limone che impedisce alle carote o alle mele tagliate di ossidarsi, diventando scure. Questo effetto antiossidante protegge il nostro corpo dall'azione dei residui del metabolismo noti come radicali liberi, principale fattore di invecchiamento precoce e degenerazione delle cellule alla base di arteriosclerosi, cancro e demenza. Infine, è indispensabile per la formazione di alcuni mediatori chimici cerebrali indispensabili al funzionamento del sistema nervoso, e del collagene, molecola di struttura dell'organismo. Il collagene è l'impalcatura di ossa, cartilagini, legamenti, derma, arterie, vene, capillari e qualunque tessuto del corpo. Ecco perché alla carenza di vitamina C seguono prima disturbi dell'umore e poi un lento sfacelo del corpo.

Inizia dove il collagene si rinnova più di frequente: legamenti dei denti, gengive, tubo digerente, capillari, pelle. Oppure dove è prodotto *ex novo*, come nelle ferite. Da questo sfacelo generalizzato progressivo, quel corteo di sintomi molto diversi uno dopo l'altro, da sbalzi d'umore e irritabilità alle emorragie sottocutanee, dai dolori intestinali alle ferite che non guariscono e poi si infettano,

malesseri così differenti da mettere in crisi anche i medici di oggi. Tranne quando le gengive diventano infiammate, doloranti e cadono i denti. Sintomi così particolari da far pensare a un flagello diverso dagli altri che falciano i marinai, e come tale raccontato per la prima volta solo nel 1572. È l'anno di pubblicazione del poema epico *Os Lusiadas* di Luís Vaz de Camões, una sorta di *Eneide* della cultura portoghese, con Vasco da Gama, che nel 1497 tornò dall'India con metà equipaggio falciata dallo scorbuto, al posto di Enea. Ma per tutta l'era della vela a bordo vi era ben altro da fare che osservare, analizzare e distinguere tra loro i numerosi mali di cui si moriva, tantomeno leggere poemi epici in portoghese. Il primo problema era avere una ciurma. Il secondo governarla.

La mortalità dei marinai era altissima. Un esito che, insieme alle permanenze in mare di anni e la dura vita di bordo, rendeva il mestiere di marinaio il meno appetibile in assoluto. Qualche marinaio esperto veniva reclutato a forza, soprattutto dalle marine militari. Gran parte dell'equipaggio, invece, il mare non lo aveva mai visto, composto da uomini senza nulla da perdere, in fuga da debiti o nemici, oppure presi dalle mani del boia o nelle carceri da dove portavano tifo, dissenteria, pulci, pidocchi, cimici e zecche. Sovraffollando i vascelli, per non lasciare sguarniti vele e cannoni in battaglia, esponendo la nave al nemico. O compromettere l'intera missione per l'attesa decimazione dell'equipaggio.

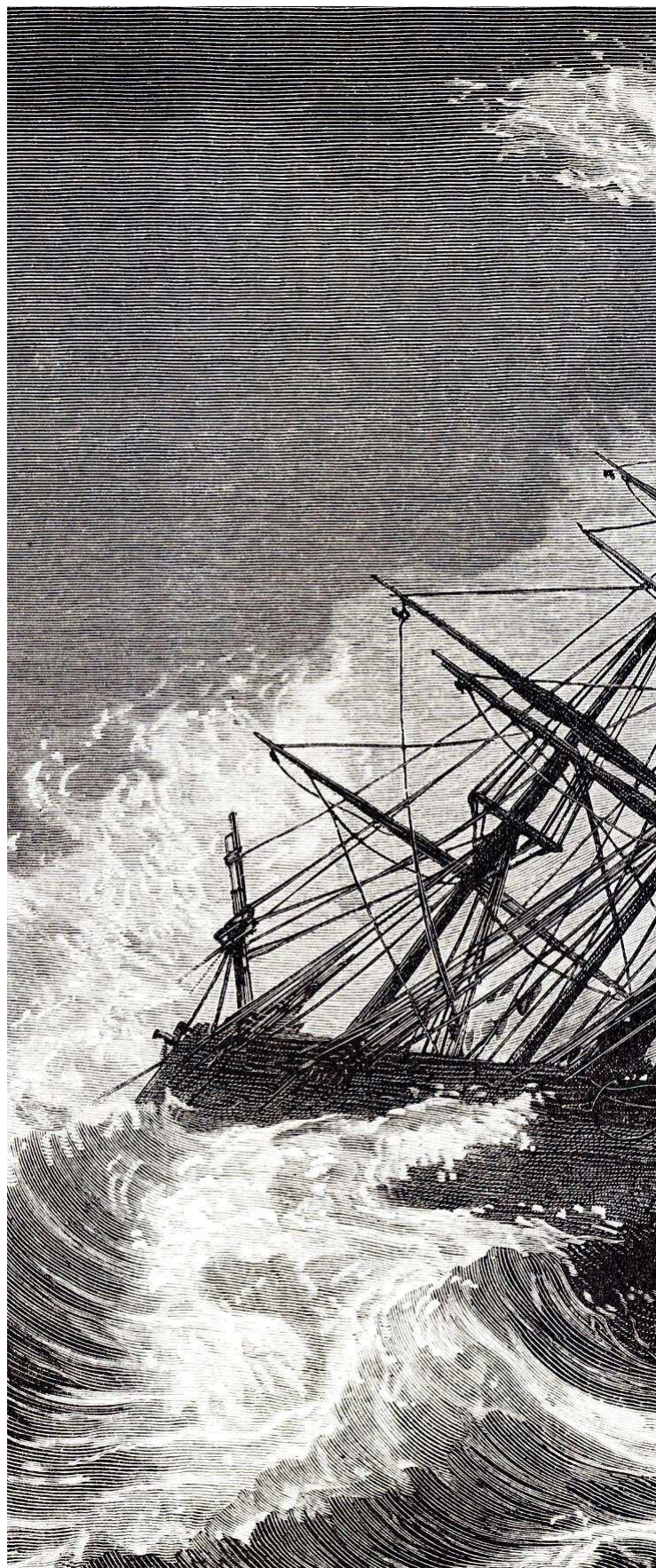
Cause terrene e divine

Dai registri del 1763 della britannica Royal Navy si apprende che nella «guerra dei sette anni» appena conclusa con la Francia su 184.899 uomini imbarcati, 1512 morirono in battaglia e 133.708 di malattie, principalmente scorbuto. Una moria che rese difficile per i medici notare i sintomi specifici delle diverse malattie. Inoltre lo scorbuto colpiva chi e quando pareva a lui. Apparentemente.

Ufficiali e ciurma sono due mondi lontani, anche nel soffrire di carenza di acido ascorbico.

In grado di permettersi a terra un'alimentazione ricca e variata, gli ufficiali salpano con le riserve di vitamine, non solo vitamina C, integre. Lo stato d'animo soddisfatto di chi quella vita se l'è cercata, sostenuto da una migliore qualità della vita a bordo. Godono spesso di cabine separate, con lo spazio per portare qualche effetto personale, stare in piedi magari piegando solo un po' la testa e dormire distesi. Un oblò assicura luce e aria pura che disperde miasmi e microbi risalenti dalle stive. Sulla tavola raramente mancano vegetali freschi presi con l'ultimo rifornimento o appena colti dal giardinetto, la porzione di ponte tra l'albero di maestra e la poppa, la più riparata dagli spruzzi di acqua di mare, dove si coltivano verdure. Sono riservate agli ufficiali, uno *status symbol*, per rendergli più piacevole la vita in mare. Per il resto, come tutti gli altri: la carne è ancora salatissima dopo la notte attaccata a una cima nella scia del veliero; le gallette, se non mollicce e muffose per l'umidità, si sbriciolano appena poggiate sulla tavola scatenando la fuga dei *bargmen*, nomignolo dato dai marinai a larve con la testa nera, così abituali che la loro assenza era considerata spia di cattiva qualità.

La maggioranza indisciplinata, rissosa e riottosa dell'equipaggio era anche quella che soffriva di scorbuto prima e più intensamente. Le riserve di vitamina C erano carenti o assenti per la scarsa alimentazione a terra dovuta a povertà, carcere o all'imbarco precedente. La carenza di varia gravità portava fin dai primi giorni, chi prima chi dopo, al rallentamento del metabolismo del cervello, con sbalzi dell'umore dalla depressione all'aggressività di un animo già malmostoso per quei reclutamenti forzati. E al blocco della produzione del collagene, i cui effetti però si manifesta-

no dopo 2-4 mesi, a seconda dei depositi di vitamina C di ognuno. Esclusa dal raccolto del giardinetto, la ciurma poteva sperare solo nei rifornimenti di cibo fresco. Ma raramente se ne aveva il tempo, il porto in vista non era nemico o gli indigeni accoglienti.

Inevitabile che comandante e ufficiali, risparmiati quasi sempre dallo scorbuto, non capiscano come questa condizione che «autorizza a battere la fiacca» sia una malattia e, come tale, curabile, cercando il farmaco giusto. Vedono invece solo malumore e indolenza, considerati naturali in quel tipo di umanità. Che peggiorano giorno dopo giorno per le dure condizioni di vita a bordo, queste sì ben evidenti a tutti. Anche ai medici imbarcati. Ma il loro status di ufficiali li salva dallo sperimentare sulla propria pelle lo scorbuto. Inoltre, concentrati su ragionamenti teorici, come usava al tempo, non vedono neanche l'unico, improvviso e clamoroso miglioramento della ciurma. Segue per qualche giorno il raro imbarco di viveri freschi, ma è attribuito ai giorni di libertà e relativi gozzovigliamenti a terra.

Per secoli il rimedio è la punizione, che va dal divieto di stare in coperta a riposare e respirare aria decente alla sospensione del rum, sino alle frustate, al «giro di chiglia» e ad altri trattamenti esemplari ed «educativi», a volte mortali, a discrezione e fantasia di capitani dittatori assoluti per legge, pronti a buttare a mare un uomo solo perché manca di rispetto. Affiancati a cure che allora sembravano sensate. Nel dubbio, comunque, sempre meglio di niente.

Nell'era della vela si stampano dozzine di trattati medici, per lo più nel Settecento. Dopo lunghe disamine teoriche, la causa dello scorbuto è indicata di volta in volta in: miasmi, umidità, freddo, uno squilibrio degli umori della dottrina ippocratica, pigrizia, intossicazione da rame, predisposizione ereditaria, occlusione dei pori della pelle e, ovviamente, l'ira divina. Chiamata in causa anche dai marinai pronti a trovare il peccatore o l'indemoniato che Dio puniva mandando uragani, bonacce o malattie varie. Il compagno che avevano le sventura di incarnare le superstizioni accese da ignoranza e paura, faceva una brutta fine, inutilmente.

Meno scorbuto, meno tasse

Altrettanto fuori dalla realtà le cure, mai verificate. Purghe, acqua di mare via clistere o bevuta in abbondanza o somministrata con energica secchiata sul corpo, sorsate di aceto, di acido solforico diluito, affiancati spesso dal salasso. Nonostante la totale assenza di benefici, se andava bene, nessuna di queste terapie fu abbandonata. La confusione creata dalla concomitanza di più malattie, la variabilità dei sintomi tra le missioni, nelle navi della stessa flotta, in una nave e tra i singoli marinai, nonché i miglioramenti improvvisi, sembravano confermare l'efficacia di cure assurde ma anche delle punizioni o dell'uccisione dell'indemoniato.

Rimane lettera morta la scoperta di Sir James Lancaster, figura di spicco della marina commerciale britannica. Il 1° agosto 1601, dopo quattro mesi di navigazione, nelle tre navi al seguito è comparso lo scorbuto, ma non nella sua. Il relativo rapporto rimane sepolto negli archivi della Royal Navy. Lancaster non è un medico, non fornisce chissà quale complicata teoria. Inoltre la cura appare stravagante, esotica, di difficile reperimento e costosa, a quei tempi. Lancaster aveva somministrato a ogni uomo tre cucchiai al giorno di succo limone.

«Pezzi da otto! Pezzi da otto!», gracchia il pappagallo sulla spalla del pirata Long John Silver in *L'isola del tesoro* (1883), romanzo dello scozzese Robert Louis Stevenson. Erano monete di argento puro coniate dalla Spagna del valore di otto real spagnoli, le più ambite dai pirati, non solo, perché valide in tutto il mondo. Di que-

ste monete Sir George Anson ne lascia nel Pacifico 1.313.843, oltre ai carichi preziosi delle sue cinque navi da guerra, abbandonate per lo scorbuto. Un tesoro enorme razziato agli spagnoli: solo quello sbarcato dalla sua nave, l'unica superstite, il 15 giugno 1744, vale un anno di tasse dei sudditi britannici. L'ennesima occasione economica, militare e politica persa. Mesi dopo entra in Parlamento, porta all'attenzione pubblica il problema dello scorbuto, e delle tasse che i britannici si sarebbero potuti risparmiare, trovando terreno fertile. Il Regno Unito non si può più permettere la perdita di uomini, navi e relativi carichi per la moria di marinai.

Arrivano i limoni

Medico di bordo militare, il britannico James Lind si appassiona allo scorbuto per la vicenda di Anson, cui dedicherà il suo *Treatise of the scurvy*, del 1753. Prima consulta gli 80 trattati disponibili, tutti elaborati su malati studiati in ospedale e da medici mai stati in mare. Consulta anche l'archivio della Royal Navy, dove c'è il rapporto di Lancaster sui benefici dei limoni che entrano nella lista delle cure praticate che stila. Con flaconi pieni di sidro, vetriolo, aceto, e sacchi di arance, limoni, aglio, semi di mostarda, balsamo di rafano del Perù, orzo, tamarindi e crema di tartaro, Lind si imbarca all'inizio del 1747. E aspetta.

A maggio vi sono già molti malati che, per la prima volta, sono affrontati con una strategia precisa, quella del moderno farmacologo: «Il 20 maggio 1747, selezionai 12 malati di scorbuto, a bordo della Salisbury, durante la navigazione. Feci in modo che i loro casi fossero i più simili possibile. Tutti hanno gengive putride, macchie, stanchezza e ginocchia deboli. Giacciono insieme nella stiva di prua. Identica la dieta: pappa di gallette con zucchero la mattina; per cena brodo di montone fresco [a bordo si portavano spesso animali vivi, N.d.R.]; oppure brodini leggeri, biscotto bollito con zucchero, o uvetta e orzo, riso e ribes e il vino, o simili».

Il potere vitaminico del succo di limone era conservato grazie all'aggiunta di rum

La verifica dell'efficacia di una cura è una sorta di «corsa per la guarigione». Per essere certi che il recupero della salute sia merito del farmaco, i partecipanti devono «gareggiare alla pari»: identica la malattia che li affligge (anche oggi ci si può sbagliare) e la sua gravità, mangino lo stesso cibo e dormano e vivano nello stesso luogo. Dopo aver formato sei coppie di due malati ciascuna, Lind reperisce sul posto il «farmaco» più usato, l'acqua di mare, e inizia la somministrazione delle sei cure, descrivendo in modo dettagliato dosi e tempi. Riassumendo: alla prima coppia di marinai limoni e arance, alla seconda vetriolo diluito, alla terza aceto, alla quarta sidro, alla quinta acqua di mare per bocca e a getto sul corpo, alla sesta infine un miscuglio di tutto quello che avanza, dall'aglio alla crema di tartaro.

In soli sei giorni questo rudimentale prototipo del trial clinico odierno si conclude per esaurimento di una delle cure. La coppia degli agrumi, dopo la prima dose quotidiana di due arance e un limone, ne ha arraffati di più, esaurendo la scorta. Uno dei due marinai è tornato al lavoro, l'altro riesce a fare da infermiere alle altre «cavie», che invece peggiorano nonostante le cure. Rimane stabile la coppia del sidro, un fermentato alcolico di mele, dove un po' di vitamina C della frutta originaria doveva essere rimasta. Sei anni dopo esce il trattato in cui Lind estende gli effetti benefici degli agrumi alle «verdure verdi e fresche e i frutti maturi», sollecitando l'inclusione almeno di un limone al giorno nella dieta dei marinai.

Proprio in quegli anni la massima autorità della scienza inglese, il presidente della Royal Society Sir John Pringle, rimane affascinato da una teoria. Secondo il medico irlandese David MacBride, lo scorbuto è un'infezione trasmessa da miasmi, quell'aria putrida già invocata per la malaria e la peste, e che sulle navi esala dalle stive. Per combatterlo basta prendere il malto d'orzo a cui da tempo erano attribuite proprietà benefiche e potenziarle con un lungo e complicato trattamento di aerazione-ebollizione-aerazione anti-miasmi. Il dotto ragionamento entusiasma il presidente della Royal Society che, con tutto il suo prestigio, smantella l'esperimento di Lind e sostiene la validità del malto d'orzo.

Nonostante ciò, la cura di Lind è praticata dalla Royal Navy, ma si rivela non così efficace, ed è soprattutto poco pratica. I limoni devono essere comprati a caro prezzo nel lontano Mediterraneo e da paesi non proprio amici che, scoperto il reale uso, si sarebbero ben guardati dal continuare a vendere. Meglio i *lime*, che abbondano nelle colonie tropicali da cui si avvia una produzione massiccia di succo. Ma lo scarso contenuto di vitamina C (un terzo dei limoni) e i modi di preparazione, concentrazione e conservazione del succo che includono bolliture e, spesso, il contatto con pentoloni e alambicchi di rame, passaggi che distruggono l'acido ascorbico, rendono il succo di lime poco efficace. Con il malto d'orzo le cose non vanno molto peggio, ma almeno è abbondante ed economico.

Nei decenni successivi lo scorbuto continua a martoriare i marinai. Tranne quelli che seguono il navigatore britannico James Cook nei suoi tre giri del mondo compiuti tra il 1768 e il 1779, coprendo in 12 anni 300.000 chilometri, la distanza tra la Terra e la Luna. Cook, che ha letto Lind, fa frequenti rifornimenti di verdura e frutta fresca. Nessun marinaio muore di scorbuto in quei 12 anni mentre le epidemie, in particolare quella di malaria già nel primo viaggio, colpiscono duro come al solito. Osservazione preziosa, perché chiarisce a tutti, finalmente, che lo scorbuto non ha nulla a che vedere con le infezioni, è una malattia a sé, ed è legata all'alimentazione, in particolare alla disponibilità di verdure e frutta fresca, come aveva dimostrato Lind. Con l'inclusione di Cook nella Royal Society, che lo insigne della Medaglia Copley nel 1776 proprio per questa osservazione, la vicenda del malto del suo presidente è chiusa per sempre. O almeno sembra.

Tre anni dopo, nel 1779, il dottor Gilbert Blane, futuro Sir, si imbarca su una nave militare. Nei dieci anni seguenti, passati a combattere gli spagnoli, Blane si fa mandare dai colleghi delle altre navi rapporti regolari sui marinai curati spesso ancora col malto e martoriati dallo scorbuto. Un anno dopo, nel 1780, pubblica un primo trattato sui metodi più efficaci per preservare la salute dei marinai, in particolare della Royal Navy, in cui analizza tutte le condizioni di vita a bordo, non solo l'alimentazione, ma anche l'igiene, le dimensioni degli ambienti, la ventilazione di cabine e stive e così via. Le sue indicazioni migliorano da subito salute ed efficienza degli equipaggi. Divenuto commissario generale per «le malattie e le ferite a bordo», nel 1795, convince finalmente l'Ammiragliato a ordinare che ogni giorno i marinai abbiamo una dose di succo di limone fresco. E come succo fresco ora funziona anche quello del lime, più povero di acido ascorbico. Abbondante nelle colonie tropicali, il lime soppiantò i limoni e fruttò agli inglesi tutti, non solo quelli imbarcati, il soprannome di *limey*.

Il nomignolo testimonia quanto limoni e lime fossero considerati una curiosità dalle altre marine militari e civili, non un salvavita. O un'arma strategica.

Una cura efficace. Un'illustrazione che ritrae James Lind, il medico di bordo militare che a metà del Settecento scoprì le virtù terapeutiche degli agrumi in caso di scorbuto.

Bettmann/Getty Images

Il 21 ottobre 1805, dopo un anno di inseguimenti nell'Atlantico e nel Mediterraneo, le flotte franco-spagnola e britannica si scontrano al largo di capo Trafalgar, costa oceanica della Spagna. L'ammiraglio britannico Horatio Nelson vince, e muore alla fine della battaglia, salvando dalle mire di Napoleone la patria a cui consegna il dominio dei mari fino alla prima guerra mondiale. Merito della tattica innovativa, ma anche delle perfette condizioni dei suoi uomini nonostante i tanti mesi in mare aperto. Da dieci anni giusti vige l'ordinanza voluta da Blane, e sulla flotta di Nelson il succo è addizionato al rum, il cui alcool, allora non lo sapevano, conserva il potere vitaminico. Nonostante ciò, l'altra marina britannica, quella mercantile, aspetterà altri settant'anni anni per emettere una ordinanza come quella della Royal Navy.

Il nuovo mondo delle vitamine

Oggi sembrano inutili tragedie, frutto di ignoranza o pregiudizio. Ma, alla luce delle conoscenze di allora, non era facile comprendere che, proprio nell'era della vela, un nuovo mondo si stava intravedendo anche per la medicina.

Non era scontato immaginare che negli alimenti ci fosse altro di vitale, ma invisibile e insapore, la cui carenza non scatena fame, sete o altre sensazioni forti. Elementi necessari per vivere, ma non in migliaia di grammi al giorno come l'acqua, centinaia di grammi come proteine, carboidrati e grassi, bensì in millesimi di grammo. E, immaginato tutto ciò, iniziare a cercare.

L'individuazione di un non meglio definito fattore antiscorbuto nel cibo ha portato in pochi decenni alla scoperta di fattori antiberiberi, antipellagra, antianemia, antirachitismo, anticecità notturna e così via, ribattezzate in seguito coi nomi di vitamina C, B1, B2, B6, B12, D, A e altro ancora. E, da questi, alla scoperta di altri nutrienti vitali, sempre in dosi di milligrammi al giorno, altrettanto inodori, insapori e la cui mancanza non è denunciata da alcuna sensazione. Sono magnesio, ferro, rame, calcio, fosforo, sodio, potassio e tanti altri minerali. Un nuovo mondo che oggi si racchiude nel termine «micronutrienti».

Non a caso nel 1937 alla vitamina C vanno due Nobel, per la medicina ad Albert Szent-Györgyi, che dimostra che il fattore antiscorbuto è l'acido ascorbico, e per la chimica a Sir Walter Norman Haworth, che lo sintetizza. Premi conferiti alla scoperta di un nuovo continente della conoscenza da conquistare e non ai benefici immediati, che risalgono a Lind. Per questo i Nobel (dieci in totale gli scienziati premiati per le vitamine) arrivano spesso decenni dopo la pubblicazione delle relative scoperte, quando e se, succede raramente, il velo su una terra prima sconosciuta è stato alzato.

Negli ultimi decenni la genetica ha spiegato che cosa è successo. Facendo capire anche perché lo scorbuto sia una malattia anomala, capricciosa, subdola, al punto da essere rimasta nascosta per secoli. Pur essendo sotto gli occhi di tutti.

La specie umana, al pari di poche altre specie, tra cui le scimmie antropomorfe, i porcellini d'india e i pipistrelli fruttivori, ha una dieta variata basata su frutta e verdura fresche. In queste specie l'evoluzione, che tende a privilegiare solo ciò che serve, ha lasciato per strada gli ingombranti sistemi genetici ed enzimatici che assemblano quelle sostanze indispensabili, ma che non mancano mai. L'evoluzione non poteva prevedere che una di queste specie avrebbe costruito prima imbarcazioni e poi navicelle spaziali capaci di non rifornirsi per mesi e anni. Molto più dei due-tre mesi in cui inizia a colpire la carenza di vitamina C, e che impiegò l'*Oriflama* per avvicinarsi senza fare scali alla sua destinazione nel Nuovo Mondo. Nel 1770, anno in cui Cook incrociava da quelle parti con equipaggi in salute e di buon umore, 13 anni dopo la pubblicazione del trattato sullo scorbuto di Lind. ■

PER APPROFONDIRE

Observations on the Diseases of Seamen. Blane G., Creative Media Partners, 2018.

Scurvy. Bown S.R., Thomas Dunne Books, 2003.

Log of the Centurion: Based on the original papers of Captain Philip Saumarez on board HMS Centurion, Lord Anson's flagship during his circumnavigation, 1740-1744. Heaps L., Macmillian Publishing, 1973.

Seguire l'acqua

Risolvere i problemi idrici globali porterà benefici anche a quelli di cibo ed energia

Gli Obiettivi per lo sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite puntano a un mondo equo e resiliente dal punto vista economico e ambientale. Sono 17 e hanno 169 traguardi in totale. Da dove dovrebbe iniziare un paese, magari con risorse limitate? Gli esperti affermano che gli obiettivi per acqua, cibo ed energia sono intrecciati e cruciali. Secondo un'analisi, le soluzioni per l'acqua offrono i maggiori vantaggi sinergici per tutti e tre (*grafico più grande*) e hanno solo piccoli effetti negativi (*grafico piccolo*). «Vogliamo che i decisori politici vedano che questi obiettivi devono essere raggiunti insieme e che l'acqua è l'affare migliore», dice Marinela Fader, dell'International Center for Water Resources and Global Change, in Germania.

Mark Fischetti

Sinergie positive

Il perseguimento di alcuni traguardi per acqua, cibo ed energia compresi negli Obiettivi per lo sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite (*numerati con le loro designazioni ufficiali*) rafforza il progresso in altri. Nel complesso, i traguardi per l'acqua hanno i benefici maggiori.

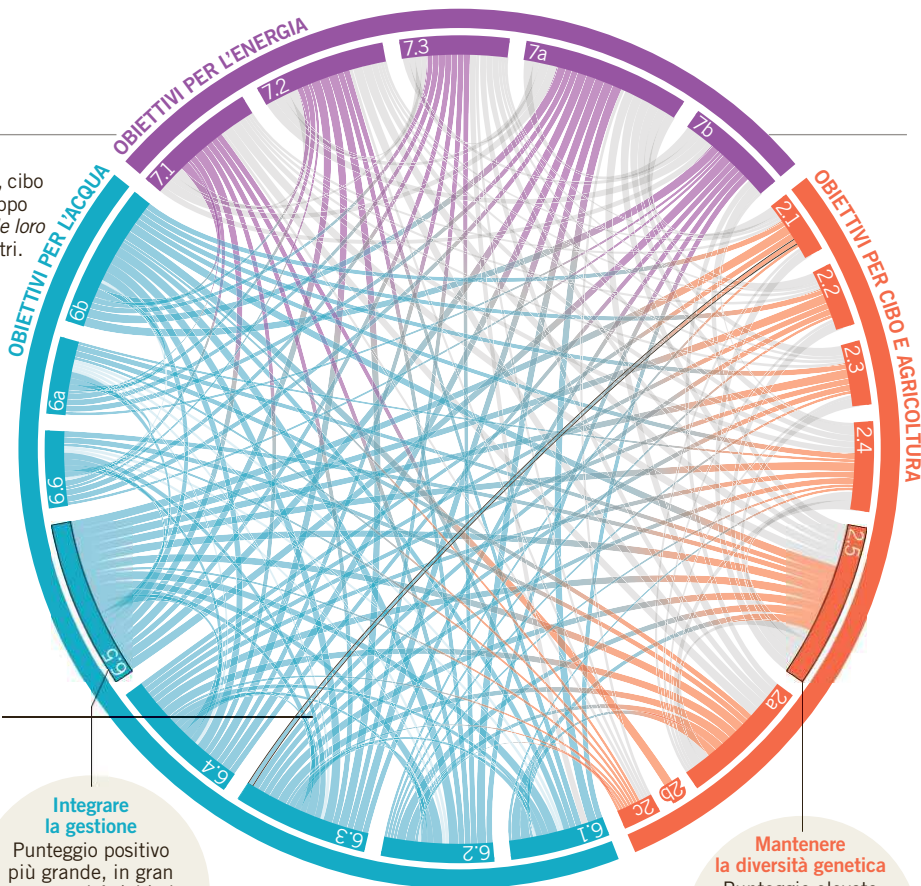
Sinergia con altri traguardi

Calcolo della forza della sinergia

Coppie di traguardi sono state valutate in base a otto criteri. Per ciascun criterio, un beneficio reciproco tra la coppia ha ottenuto +1, e uno scambio negativo ha segnato -1. La somma degli otto punteggi ha dato un totale, mostrato nei cerchi come lo spessore della linea che collega la coppia. Per esempio, i traguardi 2.1 e 6.3 hanno tre sinergie (+3), uno scambio negativo (-1) e quattro interazioni neutrali (0), quindi hanno totalizzato +2.

Criteri valutati

Gli otto criteri sono stati: fabbisogno idrico; fabbisogno di terreno e di suolo; di elettricità e di carburante; di strade, condutture e altre infrastrutture grigie; fabbisogno di istruzione e di infrastrutture tecnologiche; di assistenza sanitaria; benefici e rischi per i servizi ecosistemici per persone o per il pianeta.

OBIETTIVI PER L'ENERGIA · OBIETTIVI PER CIBO E AGRICOLTURA · OBIETTIVI PER L'ACQUA

Integrare la gestione
Punteggio positivo più grande, in gran parte perché richiede poche risorse e fornisce molti benefici a persone ed ecosistemi.

Mantenere la diversità genetica
Punteggio elevato perché è cruciale per numerosi traguardi del cibo e dell'acqua e non presenta complicazioni per altri traguardi.

OBIETTIVI PER L'ENERGIA
- 7.1 Assicurare l'accesso
- 7.2 Espandere le fonti rinnovabili
- 7.3 Migliorare l'efficienza
- 7a Trasferire tecnologia
- 7b Modernizzare le infrastrutture

OBIETTIVI PER CIBO E AGRICOLTURA
- 2.1 Sconfiggere la fame
- 2.2 Sconfiggere la denutrizione
- 2.3 Raddoppiare la produttività
- 2.4 Produrre sostenibilità
- 2.5 Mantenere la diversità genetica
- 2a Investire in agricoltura rurale
- 2b Mettere fine a distorsioni nei mercati
- 2c Migliorare il mercato delle commodity

OBIETTIVI PER L'ACQUA
- 6.1 Rendere sicura l'acqua potabile
- 6.2 Fornire una igienizzazione adeguata
- 6.3 Migliorare la qualità
- 6.4 Aumentare l'efficienza
- 6.5 Integrare la gestione
- 6.6 Ripristinare ecosistemi
- 6a Cooperare internazionalmente
- 6b Coinvolgere comunità locali

Scambio negativo

Il perseguimento di un traguardo può comprometterne un altro. Vari traguardi per acqua, cibo ed energia hanno uno scambio negativo. Eppure la maggior parte di essi ha più di una sinergia positiva (*grafico più grande*), compensando così le complicazioni. (*Cerchio allargato per leggibilità.*)

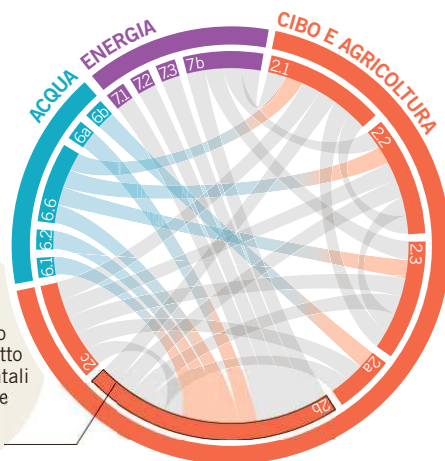
Correlazione negativa con altri traguardi: –1 (lieve)

ACQUA · ENERGIA · CIBO E AGRICOLTURA

Mettere fine a distorsioni nei mercati
Punteggio negativo più grande, soprattutto per problemi ambientali come degradazione del suolo e deforestazione.

Fonte: *Toward an Understanding of Synergies and Trade-Offs Between Water, Energy, and Food SDG Targets*, di Marianela Fader e altri, in «Frontiers in Environmental Science», Vol. 6, articolo 112, 18 novembre 2018

di Paolo Attivissimo

giornalista informatico e studioso
della disinformazione nei media

Intelligenza artificiale al volante

Nonostante gli sforzi delle case automobilistiche
questa tecnologia ha ancora molti limiti

L'automobile a guida assistita sulla quale mi trovo sta in corsia da sola, rallentando e accelerando in base al traffico e mantenendo la distanza dal veicolo che mi precede lungo l'autostrada. Non si stanca e non si distrae; guarda in tutte le direzioni contemporaneamente grazie a telecamere multiple.

Se tento un sorpasso senza accorgermi che sta sopraggiungendo un'altra auto, mi corregge. Avvicinandosi a una confluenza, riconosce le automobili che vogliono immettersi e si adegua al loro flusso. Se un veicolo mi taglia la strada, la mia auto frena e, se ha visto che la corsia adiacente è libera, si scansa, evitando un incidente. Queste decisioni vengono prese sulla base di una rete neurale che riconosce segnaletica, auto, moto, pedoni e altri ostacoli.

Visioni diverse del mondo

Riconoscere gli oggetti è semplice per gli esseri viventi ma molto difficile per un computer, che non «sa» per esempio che cos'è un cane o un passaggio a livello come lo sappiamo noi attraverso i nostri sensi, il ragionamento e l'esperienza. L'intelligenza artificiale di questa automobile riconosce gli oggetti esclusivamente in base al loro aspetto visivo: le sono state date in pasto tantissime immagini etichettate di cani, camion, ciclisti e altro ancora in varie posizioni e condizioni d'illuminazione, finché è riuscita a riconoscere gli schemi visivi generali di questi oggetti in modo affidabile.

Per questo processo servono milioni di campioni, ma serve soprattutto una varietà estrema: solo per quanto riguarda il riconoscimento di veicoli, occorre dare alla rete neurale immagini di auto che rimorchiano barche, camion che portano auto, persino automobili cappottate. La realtà stradale è molto più complessa e varia di quello che si immagina: un'auto che porta una bicicletta sul retro è da considerare come un'automobile oppure come una bici messa di traverso sulla strada? Una foto di una persona stampata sulla fiancata di un camion è un pedone in mezzo al traffico? Per noi è facile rispondere, perché usiamo la nostra conoscenza del mondo, ma per un'intelligenza artificiale che si basa esclusivamente sulla visione il problema è tutt'altro che banale.

Vincono i neuroni, per ora

Nonostante le promesse e gli sforzi delle case automobilistiche, non è ancora certo che si possa ottenere un livello sufficiente di competenza e sicurezza nella guida usando esclusivamente un numero enorme di esempi visivi e che non serva una conoscenza più elevata della realtà, se non altro per gestire i casi limite.

Un altro problema è che la rete neurale riconosce gli oggetti in modo differente da un essere umano e si fa ingannare in modo altrettanto differente, tanto che ricercatori del Keen Security Lab cinese sono riusciti a far andare contromano una di queste auto piazzando sulla strada adesivi sostanzialmente invisibili ai conducenti ma interpretati dalla rete neurale come linee continue di delimitazione di corsia. Questi *adversarial attack* possono interessare anche i cartelli stradali, creando falsi divieti o limiti di velocità che non vengono percepiti dalle persone ma ingannano il sistema di guida. Anche escludendo sabotaggi intenzionali, questi casi rivelano i limiti attuali di questa tecnologia.

Incontro un altro di questi limiti quando l'auto sterza di colpo per rimettermi al centro della corsia: ha creduto che stessi sbandando verso un muretto, ma in realtà stavo solo stringendo un po' una curva che conosco bene. Ora apprezzo un po' meglio la povera scienza dei neuroni e del loro complesso e incessante lavorio, che ha battuto la rete neurale artificiale. Per ora.

di Beatrice Mautino

biotecnologa, giornalista e comunicatrice scientifica. Tra i suoi libri più recenti *Il trucco c'è e si vede* (Chiarelettere, 2018)

Il sudore e la puzza

Le componenti della sudorazione sono due e i prodotti possono agire su una sola o entrambe

Il sudore, di per sé, non puzza. Lo so che con l'arrivo dell'estate questa mia affermazione può suonare poco realistica, ma è così. Il sudore è un liquido incolore e inodore fatto per il 98-99 per cento di acqua. Se non puzza, però, perché un viaggio in autobus rischia di trasformarsi in un'esperienza estrema? La colpa, se così vogliamo chiamarla, non è nostra, ma dei batteri che abitano le nostre ascelle e che ci ripagano del nutrimento che diamo loro emanando un olezzo che può essere più o meno intenso a seconda dei casi.

Questa precisazione, che può sembrare superflua, diventa fondamentale nel momento in cui ci troviamo a scegliere un deodorante. Per capire il perché dobbiamo ripercorrere la scia a ritroso e tornare all'inizio del processo.

Una nicchia calda e umida

La nostra pelle è disseminata di ghiandole sudoripare, la maggior parte delle quali si distribuisce uniformemente sul corpo e libera un sudore salato con la funzione di abbassare la temperatura interna quando, per i motivi più disparati, tendiamo a scaldarci troppo.

Un sottogruppo di queste ghiandole, chiamate «apocrine», si concentra soprattutto nella zona delle ascelle, dell'inguine e in prossimità dei peli e produce un liquido lattiginoso che contiene proteine, carboidrati, sali di ammonio e ormoni: una manna per i batteri, che ci si nutrono come fosse un banchetto nuziale e rilasciano le loro puzzolenti scorie nell'ambiente circostante. A questo dobbiamo aggiungere la struttura anatomica dell'ascella, una nicchia calda e umida in cui i batteri possono proliferare, e una variazione del numero di ghiandole e della composizione del sudore in base a genetica, genere ed età, come sanno bene i genitori degli adolescenti, soprattutto maschi.

Da questa breve descrizione possiamo però già capire come le componenti della sudorazione siano due, da un lato la produzione vera e propria di sudore e dall'altro l'odore. Su questi due aspetti si concentrano quei prodotti che, per tradizione, definiamo deodoranti, anche se dovremmo distinguerli quanto meno in due grandi categorie: i deodoranti propriamente detti che agiscono sull'odore coprendolo o eliminandone la fonte e gli antitraspiranti che agiscono, invece, sulla quantità di sudore emesso.

Asciutti e profumati

Il primo deodorante commerciale della storia è stato il Mum, brevettato nel 1888, da Edna Murphey, che aveva come ingredienti principali le fragranze, per mascherare l'odore, unite a sostanze ad azione antibatterica come lo zinco. Gli ingredienti che storicamente hanno caratterizzato gli antitraspiranti, invece, sono i sali di alluminio. Queste sostanze, a contatto con il sudore, formano un tappo gelatinoso che ostruisce, almeno parzialmente, la ghiandola sudoripara riducendo la fuoriuscita del sudore da un minimo del 20 a un massimo del 50 per cento.

Non per niente, il primo antitraspirante della storia, a base di cloruro di alluminio, è stato chiamato Ever Dry, «sempre asciutto». Era il 1903 e nel giro di pochi anni hanno fatto la comparsa sul mercato prodotti dai nomi meravigliosi come Odo-ro-no, messo a punto da un chirurgo di Cincinnati come rimedio per le sue mani sempre troppo sudate e venduto poi dalla figlia in tutti gli Stati Uniti grazie a una campagna di marketing femminista, oppure Stopette, un antitraspirante con una formula brevettata dal chimico Jules Montenier che risolveva il problema delle macchie sui vestiti lasciate dai prodotti precedenti.

Oggi sul mercato troviamo deodoranti, antitraspiranti e, molto più spesso, prodotti ad azione doppia con ingredienti che sono l'evoluzione di quelli storici e che agiscono su più fronti per tenerci, come dicevano le pubblicità dell'epoca, asciutti e profumati.

di Dario Bressanini

chimico, divulgatore, gastronomo. Autore di *Contro natura* (Rizzoli, 2015), *La Scienza della Carne* (Gribaudo, 2016)

Peperoni vitaminici

I peperoni di colore rosso contengono molta più vitamina C rispetto agli agrumi

Molte persone associano la vitamina C a frutta come arance e limoni. Il loro succo contiene 40-50 milligrammi di vitamina C per 100 grammi. La vitamina C però si trova anche in moltissimi ortaggi, come i peperoni, che a crudo ne possono contenere anche più del triplo.

Ma se li cuociamo? Una preoccupazione diffusa quando si parla di vitamine contenute nel cibo è che scompaiano durante la trasformazione oppure la cottura. Ci sono persone convinte che la vitamina C di una spremuta d'arancia scompaia nel nulla se non la si beve immediatamente. Bevete tranquilli senza fretta la vostra spremuta anche se l'avete preparata un'ora prima: la vitamina C non scompare così velocemente. In generale, comunque, se avete un'alimentazione variata e senza restrizioni, ricca di frutta e verdura sia cruda sia cotta, non dovreste preoccuparvi dei livelli di vitamine che assumete.

Colori diversi, concentrazioni diverse

Magari però siete curiosi di sapere quale metodo di cottura riduce di meno il contenuto di vitamina C dei peperoni.

Sono stati pubblicati centinaia di studi scientifici che hanno esaminato la perdita di vari nutrienti, tra cui le vitamine, a seguito di vari tipi di cottura praticamente per ogni tipo di alimento, e il peperone con il suo elevato contenuto di vitamina C e di carotenoidi è stato molto studiato. Uno studio del 2008 ha confrontato la perdita di vitamina C rispetto all'ortaggio crudo di peperoni di colori diversi sottoposti a cotture diverse: al microonde a 500W per cinque minuti, saltati in padella con poco olio a fuoco alto per cinque minuti o bolliti per cinque o 30 minuti.

Le alte temperature accelerano l'ossidazione della vitamina C quindi ci si aspetta in generale una perdita. È interessante notare prima di tutto che il contenuto di partenza di vitamina C del peperone è fortemente dipendente dal colore: mentre il peperone rosso a crudo contiene 191 milligrammi di vitamina C per 100 grammi, quello verde ne contiene solo 77 milligrammi per 100 grammi, meno della metà, anche se sempre di più di un'arancia. I peperoni gialli hanno valori leggermente più bassi del peperone rosso ma sempre molto più elevati di quello verde. I peperoni verdi sono quasi sempre peperoni acerbi, ed è solo con la maturazione che, insieme ai carotenoidi che gli doneranno il colore rosso, arancione o giallo, avviene una sintesi e un accumulo di vitamina C nei tessuti.

Risultati di cottura

Gli esperimenti hanno mostrato che, cotti al microonde o saltati con l'olio, i peperoni subiscono una perdita non significativa di vitamina C. Questi risultati confermano quanto trovato da altri scienziati che avevano notato come il microonde non riducesse significativamente la vitamina C di carote, broccoli e fagiolini. La bollitura invece fa perdere un po' di questa vitamina ai peperoni: dopo cinque minuti i peperoni rossi perdono dal 30 al 40 per cento di vitamina C. Quelli verdi dal 40 al 50 per cento. Dopo 30 minuti le perdite di vitamina C sono state anche più rilevanti.

I ricercatori però fanno notare come la vitamina C mancante non si sia necessariamente degradata. Analizzando il contenuto dell'acqua di bollitura si ritrova quasi tutta quella mancante dal peperone. Studi precedenti sulla cottura degli spinaci avevano osservato lo stesso fenomeno: dopo la cottura solo il 40 per cento della vitamina C presente inizialmente era rimasto negli spinaci cotti, il restante 60 per cento non era andato distrutto ma era invece passato nell'acqua di cottura.

Quindi, se volete assumere tutta la vitamina C dai peperoni cotti, oltre a preferire quelli rossi, cuoceteli al microonde o saltateli velocemente. E se non potete fare a meno di bollirli usate la minor quantità di acqua possibile.

Meglio non bolliti. Esperimenti su vari tipi di cottura hanno mostrato che per non perdere troppa della vitamina C dei peperoni è meglio non bollirli, ma cuocerli al microonde o saltarli in padella.

Karenicola/iStock

Ispirati dalle tonalità di grigio dell'amministratore di condominio, i Rudi elaborano una versione del problema sulla pesca alla cieca dei calzini

Cinquanta sfumature di pedalini

C'è questa strana contraddizione da risolvere una volta per tutte: bisogna rapidamente darsi da fare tutti, nessuno escluso, per cercare di rimediare agli incombenti disastri del *global warming*, e non solo per raccogliere le esortazioni di un'eroica sedicenne con le trecce, ma perché ne va dell'intero pianeta. Ma se tutti si comportano come certe persone di nostra conoscenza la battaglia sarà improba; quando la Terra si avvicina al solstizio estivo vengono ridotti tutti e tre (anzi quattro, contando i felini) a una squadra di mozzarelle infornate. Battaglia persa in partenza, insomma.

«Caldo...»

«Caldo...»

«...e le vostre affermazioni non contribuiscono sicuramente a farlo diminuire.»

«...troppe parole, Treccia. Scaldi l'ambiente.»

Bisogna riconoscere che, al momento, la temperatura raggiunge livelli tali che anche il più volenteroso e diligente dei termometri rimane stupito dalle cifre disegnate dai suoi cristalli liquidi; e basterebbe anche solo vedere come Gaetanagnesi, in cerca di un po' di refrigerio, sia riuscita magicamente a trasformarsi in una sorta di decalcomania incollata sul condizionatore (cosa che, per inciso, non contribuisce certo a rendere l'ambiente più fresco), per rendersi conto di come l'esperienza diretta e reale delle fluttuazioni delle grandezze termodinamiche sia molto, molto più difficile da gestire della risoluzione delle relative equazioni di Maxwell.

«Qualcuno mi spiega il motivo per il quale il riscaldamento globale si è dato convegno a casa nostra? Non poteva andare a rompere le scatole a qualcun altro?»

«Già. Per esempio all'amministratore di condominio. L'ho incrociato nell'ingresso del palazzo, ed è gelido come sempre.»

«Un altro insolubile mistero della fisica: quell'androne è il posto più caldo dell'Europa occidentale, e l'amministratore riesce a restarci senza minimamente perdere il suo aspetto glaciale. Potremmo invitarlo qui per vedere se riesce almeno a rinfrescare quest'ambiente.»

«Capo, le tue battute sono talmente terribili che fortunatamente non richiedono lo sforzo di ridere. E se adesso provi a dire che la tua era una "freddura" raccoglierò le ultime briciole d'energia per tirarti in testa il portacenere di cristallo, sappilo.»

«Beh, con i neuroni in ebollizione non puoi pretendere molto altro. Comunque, sull'algidità dell'amministratore è difficile avere dubbi. L'ultima volta che l'ho visto, con temperature raggiungibili solo nell'androne di casa o al centro di un *tokamak*, era una vera sinfonia di grigi: giacca, pantaloni, cappello, panciotto, cravatta... uniche eccezioni, la camicia (bianca) e le scarpe (nere). Ma potremmo considerarle un "grigio zero" e un "grigio 100", e...»

Illustrazione di Stefano Fabbri

«Temevo qualche battutaccia su una cinquantina di sfumature del suddetto colore. Non so ancora se il fatto che tu vada da zero a 100 mi tranquillizzi o preoccupi. Per sicurezza mi avvicino al portacenere...»

«No, Treccia, tranquilla – mormora flebilmente Piotr – è solo l'ennesimo ricordo di gioventù. Da giovane, Rudy (ammesso e non concesso che sia mai stato davvero giovane) sembra che si sia dilettato di fotografia, e in quei tempi gloriosi in cui per fare le foto si usavano anticaglie come i rullini in bianco e nero, era elemento essenziale per tarare gli esposimetri delle macchine fotografiche dell'epoca il cartoncino "grigio 18", che assorbe il 18 per cento della luce. È il "grigio medio", insomma quello che uguale sia nel negativo che nel positivo. La camicia bianca dell'amministratore riflette la totalità della luce incidente..».

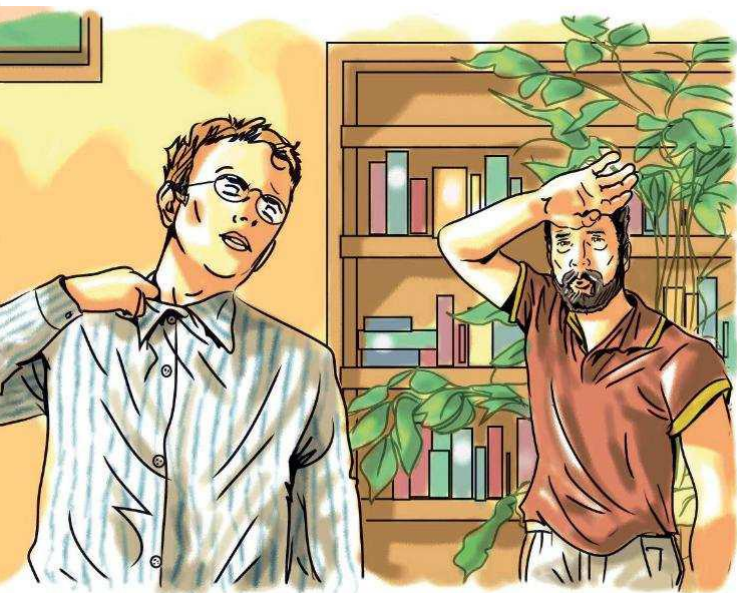
«Solo quando è pulita. E, talvolta, ho dei dubbi in merito.»

«Mentre le scarpe nere ne assorbono il 100 per cento. E dal grigio 18 ai grigi d'altra percentuale, il passo è breve. Anzi, sfumato.»

di Rodolfo Clerico,
Piero Fabbri e
Francesca Ortenzio

La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve a luglio e in forma estesa sul nostro sito: www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.

IL PROBLEMA DI MAGGIO

Il problema del mese scorso verteva su una mappa suddivisa in 10 × 10 quadrati poi ricomposti in forma di atlante, e si chiedevano considerazioni in merito all'ottimizzazione della numerazione delle pagine dell'atlante per fare in modo che non fossero eccessivamente distanti i fogli contigui sulla mappa originaria. Qualunque sia la numerazione adottata, compresa quella «naturale» che va dal quadrato in alto a sinistra (1) a quello in basso a destra (100) si vede che anche il più lungo dei viaggi richiede al massimo 18 «cambi di quadrato» (quindi, 18 operazioni di «giro pagina»).
Si supponga che, qualunque numerazione si adotti, il quadrato/foglio di partenza sia numerato «1» e quello di arrivo «100»; e inoltre che la differenza massima tra le numerazioni di due quadrati adiacenti non sia mai maggiore di k. Queste due semplici considerazioni mostrano già come il cammino più corto possibile tra il quadrato 1 e il quadrato 100 non potrà superare il valore $18k$. In alti termini, il valore $18k + 1$ è un limite superiore al percorso più lungo, qualunque sia il quadrato di partenza (1) e quello di arrivo (100). Questo può pertanto esprimersi con la disuguaglianza $(1 + k18) \geq 100$, e il minimo intero che soddisfa questa diseguaglianza è 6; in altri termini, è impossibile sperare di trovare un atlante che riduce una mappa di 10 × 10 quadrati in cui non esistano almeno due quadrati, adiacenti nella mappa originaria, che non distino almeno sei pagine nella riduzione ad atlante.

«Con voi due, si impara sempre qualcosa sulle anticaglie. Comunque, l'impeccabilità dell'amministratore mostra qualche pecca...»

«Non nei conti, spero!»

«No, quelli sono facilmente controllabili, mentre non ho nessuna intenzione di aiutarlo a controllare i calzini. E qualche giorno fa l'ho incrociato sempre tutto in grigio, ma con i calzini di due toni diversi!»

«Immagino ti sarai affrettata a fargliela notare, e lui sia fuggito arrossendo come se fosse stato sorpreso vestito da scolaretta alla riunione di condominio...»

«No, non ne ho avuto il coraggio, ma credo di aver capito cosa è successo. Certo, è un problema, scegliere al mattino (nella penombra, per non svegliare i conviventi) in un grigio cassetto zeppo di calzini due calzini uguali...»

«Me lo ricordo! Me lo ricordo! So bene dove vuoi andare a parare, Capo – salta su Piotr – stai per propinarci quel problema sulla pesca alla cieca dei calzini: se tu hai, poniamo, calzini di tre grigi diversi...»

«...facciamo dieci, Doc. Non arriverei alle celebri 50, ma almeno una decina all'amministratore gliele concederei.»

«Va bene, GC, dieci. Bene, Treccia, il problema è: quanti calzini devi estrarre, per essere sicura di avere due calzini dello stesso grigio?»

«Complimenti per la tua memoria, Doc, ma io pensavo a un qualcosa di un po' meno elementare, un po' più sfumato, direi, per restare in tema.»

«Eh?»

«Supponi il Nostro stia provvedendo al decadale...»

«Eh?»

«Lo hai già detto prima, non ripeterti. Allora, si ipotizzi che l'amministratore lavi dieci paia di calzini in dieci diverse tonalità di grigio ogni dieci giorni, e che li metta ad asciugare in una lavanderia nella quale c'è una lampadina estremamente fioca (sappiamo tutti quanto sia parsimonioso). Se al buio tutti i gatti sono bigi, nel semibuio tutti i pedalini sono grigi uguali...»

«Ho capito: lui si mette ad accoppiarli più o meno a caso e tu vuoi sapere la probabilità che finiscano tutti accoppiati in modo corretto.»

«Sono più tollerante: mi accontento che siano accoppiati con al più una differenza di sfumatura di grigio. Insomma, immaginando che le tonalità dei calzini siano 10, 15, 20, 25 e così via fino al 55, sono disposto a considerare accettabile che un calzino grigio 15 sia accoppiabile con un calzino grigio 10 o 20, oltre che, ovviamente, con il suo gemello grigio 15. Ma già accoppiare un 15 con un 25 o peggio è assolutamente intollerabile. Quale sarebbe allora la probabilità di avere tutti gli accoppiamenti accettabili? Bene, vedo che Treccia è talmente sfinita dal caldo che non lancia il portacenere neppure se parlo di probabilità.»

«Non è questione di probabilità, Capo, ma di genere. Siete voi maschietti che vi intestardite con ammennicoli da accoppiare. Noi femminucce, da tempo, per riscaldarci gli arti inferiori (non che ne senta il bisogno, di questi tempi) abbiamo inventato i *collant*. Sai qual è la probabilità di avere i piedini ricoperti dallo stesso grigio, per noi? Te lo dico io: è un uno tondo tondo.»

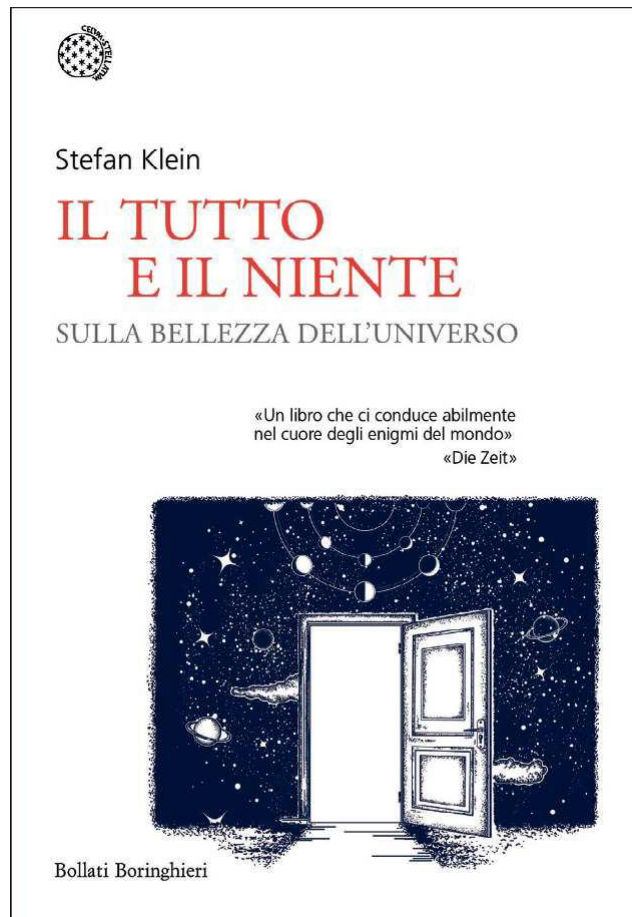
L'incanto del cosmo

Una prospettiva poetica sul procedere della ricerca scientifica

Il tutto e il niente
di Stefan Klein
Bollati Boringhieri, Torino, 2019, pp. 160 (euro 20,00)

Nella *Critica della ragion pura*, Immanuel Kant conduce un'indagine alla ricerca di che cosa sia possibile conoscere e che cosa sia frutto di superstizioni e illusioni. Ciò che percepiamo con i sensi è elaborato dall'intelletto «per finire nella ragione, al di sopra della quale non si riscontra nulla che intervenga a elaborare la materia dell'intuizione e a ricondurla sotto la suprema unità del pensiero». Da questa impostazione risulta che la scienza, strumento della ragione, ha un dominio limitato dalla natura umana: «È un'isola, chiusa dalla stessa natura entro confini immutabili. È la terra delle verità (nome seducente!) circondata da un vasto oceano tempestoso, impero proprio dell'apparenza, dove nebbie grosse e ghiacci, prossimi a liquefarsi, danno a ogni istante l'illusione di nuove terre, e, incessantemente ingannando con vane speranze il navigante errabondo in cerca di nuove scoperte, lo traggono in avventure alle quali egli non sa mai sottrarsi, e delle quali non può mai venire a capo». Si potrebbe essere tentati dal pensiero che questa limitazione corrisponda a una *diminutio*: nell'escludere dalla conoscenza ciò che non appartiene al dominio della ragione, e del metodo scientifico, si rinuncia a continenti.

Il libro di Stefan Klein dimostra il contrario: proprio la consapevolezza della limitazione della nostra capacità di conoscere fa emergere le certezze della scienza che hanno permesso di comprendere da dove deriva l'universo in cui viviamo, di realizzare applicazioni che hanno cambiato il corso della storia e la qualità della vita delle persone e di prevedere, entro certi confini, che cosa accadrà. A differenza di quanto pensava Kant, va precisato, non si tratta di verità immutabili, ma sempre provvisorie, soggette alla continua revisione della comunità scientifica e all'imprevista acquisizione di nuovi dati. Eppure, con armi apparentemente spuntate rispetto ad altre discipline, la scienza ci permette di cercare risposte a domande fondamentali, come quella implicita del titolo: come è possibile che tutto quello che ci circonda – la materia – sia composto in parte maggioritaria dal vuoto? Dopo averlo scoperto alla fine dell'Ottocento, Ernest Rutherford ha anche fornito una metafora, raccontata nel libro, che ci permettesse di coglierne il senso: gli atomi sono come sale da concerto vuote.

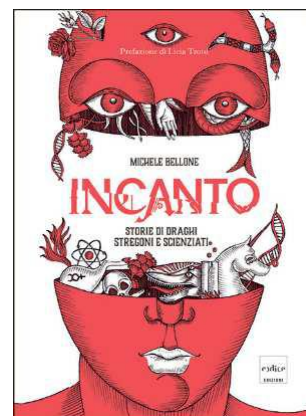
Il capitolo dedicato al vuoto e alla materia fornisce anche un esempio del metodo di procedere di Klein, in cui ci si addentra in un tema tramite una serie di agganci con ambiti diversi: dal rapporto tra l'illusione del mondo dei Veda e del film *Matrix*, passando per la fisica quantistica e la filosofia zen. Perché la particolarità di questi dieci capitoli non sta nel rivelare un nuovo punto di vista sulle nostre conoscenze sul mondo, quanto offrire una prospettiva poetica sul procedere della scienza. C'è una diffusa opinione che la poesia, una volta svelato il mistero, cioè che quando la scienza solleva il velo dalle illusioni del mondo, riconducendoci ai ristretti confini dell'isola kantiana, ci derubi della poesia. Secondo Klein non è così, e lo spiega raccontando un aneddoto su Richard Feynman. Una volta gli chiesero se studiando una rosa questa non perdesse la propria bellezza. Il fisico statunitense rispose che «riusciva senz'altro a percepire la stessa bellezza colta dall'artista, ma ne vedeva anche un'altra, più profonda, rivelata solo dalla comprensione: per esempio, il fatto che i fiori abbiano assunto i colori nel corso dell'evoluzione per attirare gli insetti».

La conoscenza dell'artista e quella dello scienziato non si escludono a vicenda ma si accostano, accumulandosi. Anzi, come ci fa notare Klein, a ogni velo che la scienza solleva, il mistero anziché diminuire aumenta per tutte le nuove domande che possiamo fare: è la storia della stessa della scienza che ci mostra come quell'isoletta kantiana, in realtà, non sia affatto una limitazione.

Marco Boscolo

Comunicare con il fantasy

La narrazione fantastica aiuta a parlare di temi di scienza

Il momento della fatidica domanda: «Ma che cosa c'entra l'astrofisica con la scrittura?», arriva praticamente sempre, come racconta nella prefazione Licia Troisi, scrittrice di *fantasy* di successo, ma anche astrofisica e divulgatrice. Nella mente del grande pubblico, come nelle granitiche certezze di accademici in Italia e all'estero, scienza e mondo fantastico sono incompatibili. La ragione è che d'istinto fatichiamo ad associare al rigore del metodo scientifico la meraviglia insita nella narrazione fantastica.
Con questo libro, il giornalista scientifico Michele Bellone contribuisce a fare chiarezza su qualcosa che, come sottolinea, i *nerd* hanno sempre saputo e cioè che la passione per la letteratura, il cinema, i fumetti che hanno al centro la tematica del sovrannaturale non è in contraddizione con la logica e la razionalità che sono il fulcro della scienza. Per dimostrarlo, invita il lettore a incamminarsi in un viaggio la cui complessità e ricchezza è chiara fin dall'indice, che ha il suggestivo aspetto della mappa che spesso si trova all'inizio delle saghe fantasy, per delineare la topologia del mondo in cui ci si dovrà muovere. Seguendo le diverse sezioni, si ha modo di comprendere come molti dei contenuti della narrazione fantastica siano un'ottima occasione per parlare di temi scientifici, dalla fisica all'evoluzione, dalla botanica alla geologia, senza trascurare le scienze sociali.
Ma il saggio di Bellone è anche, paradossalmente, l'occasione per gettare uno sguardo più disincantato al mondo della ricerca scientifica e della sua comunicazione, che, come viene messo in rilievo, ha inaspettati punti di contatto con il pensiero magico. È il caso, per esempio, delle aspettative che certa narrazione divulgativa genera riguardo ad alcune scoperte, come strumento di seduzione di lettori e spettatori da parte dei mezzi di comunicazione, o come metodo per raggiungere il pubblico per gli stessi ricercatori. Si tratta, quindi, di un testo che ha il pregio di veicolare riflessioni di grande profondità e che non ha timore di farlo parlando delle vertebre di un drago o dei poteri di un magico artefatto.

Anna Rita Longo

Incanto
di Michele Bellone
Codice Edizioni, Torino, 2019,
pp. 250, (euro 20,00)

Storia di un'impresa spaziale

La grande avventura che ha portato l'umanità sulla Luna

La sera dell'11 aprile scorso erano in molti a seguire con il fiato sospeso la diretta video dal centro controllo missione della sonda israeliana Beresheet, che avrebbe dovuto effettuare un atterraggio morbido sulla Luna. Se fosse riuscita nell'impresa, purtroppo fallita nelle fasi immediatamente precedenti l'allunaggio, Israele sarebbe stato il quarto paese a posare una sonda robotizzata sulla superficie del nostro satellite naturale, dopo l'ex Unione Sovietica, gli Stati Uniti e, in tempi più recenti, la Cina. Ma Beresheet, che in ebraico significa «genesi», avrebbe anche raggiunto un importante record: la prima sonda privata a conquistare la Luna.
La sfortunata conclusione della missione israeliana, avvenuta poco dopo che il libro andasse in stampa, è l'unica parte che manca nel libro altrimenti aggiornatissimo di Patrizia Caraveo, dirigente di ricerca all'Istituto nazionale di astrofisica, che nel cinquantenario dello sbarco del primo uomo sulla Luna ripercorre con grande cura l'avventura che ha portato nella seconda metà del secolo scorso l'umanità alla conquista prima dello spazio orbitale attorno alla Terra, poi appunto della Luna. Per infine osservare una lunga «pausa di riflessione», se si pensa che dopo l'ultima missione sovietica terminata con successo, Luna 24, dell'agosto 1976, si è dovuto attendere 14 anni per vedere di nuovo una sonda orbitare attorno al nostro satellite (la giapponese Hiten, del 1990) e ben 37 anni prima che una sonda tornasse ad allunare (la cinese Chang'e 3, nel 2013).
Ma il libro della Caraveo, estremamente preciso nel ricostruire la cronologia dell'era spaziale e a descriverne i futuri possibili (tornare sulla Luna? Colonizzare lo spazio? Andare su Marte?), è ricco anche di curiosità: dalle sorti di alcuni campioni lunari agli ammutinamenti degli astronauti col raffreddore, alle bufale lunari e molto altro. Una lettura fondamentale per capire il passato, il presente e il futuro dell'esplorazione umana dello spazio e celebrare quella che, al momento, è la più grande conquista dell'umanità: aver posato i piedi su un altro corpo celeste.

Emiliano Ricci

Conquistati dalla Luna
di Patrizia Caraveo
Raffaello Cortina, Milano, 2019,
pp. 208 (euro 19,00)

Una guida per l'universo

Quello che sappiamo e le questioni cosmologiche aperte

Duecento anni fa, quando Giacomo Leopardi scriveva *L'infinito*, nonostante la passione del grande poeta per l'astronomia e la sua fervida immaginazione, l'ultimo orizzonte del nostro sguardo sull'universo era ancora piuttosto vicino: non si conosceva l'esistenza delle galassie, la radiazione cosmica di fondo, né si poteva stimare l'età dell'universo in circa 13,8 miliardi di anni.
Il libro dell'astrofisico Amedeo Balbi è una guida completa a quello che oggi sappiamo dell'universo, e alle molte questioni aperte della cosmologia. Ma è anche una riflessione sulla natura della conoscenza scientifica, a cominciare dai suoi limiti: un esempio è proprio l'orizzonte dell'universo («siamo chiusi in una bolla sferica di informazione, e non possiamo guardare oltre. Fuori dalla bolla, presumibilmente, c'è dell'altro, ma non è osservabile»).
Balbi ricostruisce con magistrale chiarezza come siamo arrivati a costruire il modello cosmologico standard, dedicando un'approfondita analisi alle sue criticità, per esempio circa l'accuratezza con cui siamo in grado di descrivere quello che è successo nei primi istanti dopo il big bang. La proposta del modello inflazionario, elaborata 40 anni fa da Alan Guth, oggi mostra i suoi limiti e secondo Balbi - che pure ammette di essere cresciuto «nella religione di Guth» - è una ricostruzione ormai poco convincente di come sono andate le cose.
Il libro è strutturato per brevi capitoli tematici che aiutano ad avvicinare il lettore passo dopo passo a questioni teoriche tra le più complesse e aperte della cosmologia moderna: materia oscura, energia oscura, geometria dell'universo, la natura del tempo e il destino dell'universo, e le ipotesi sull'esistenza del multiverso. E negli ultimi due capitoli Balbi non disegna di raccontare come uno scienziato affronta le domande sulla presenza della vita nell'universo e l'esistenza di un creatore. Uno dei meriti principali del libro è la grande quantità di domande che ricorrono, e il modo in cui Balbi avvicina il lettore al modo di ragionare di un cosmologo. Quasi un dolce naufragare tra i pensieri dell'infinito.

Marco Motta

L'ultimo orizzonte
di Amedeo Balbi
UTET, Milano 2019,
pp. 224 (euro 17,00)

L'esempio vegetale

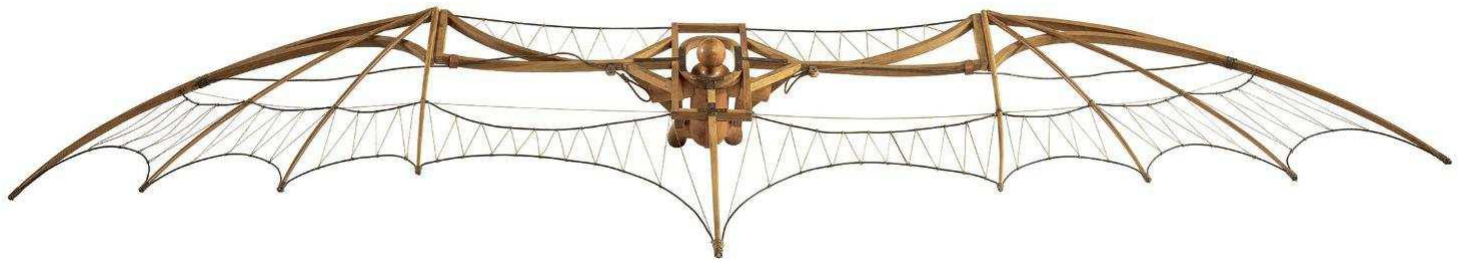
Il mondo delle piante indica soluzioni per la crisi ambientale

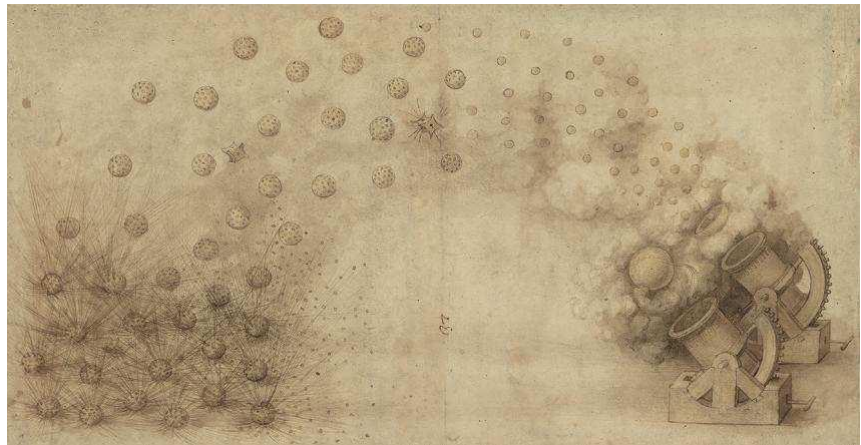
In uno scenario politico che vede i populismi nazionalisti riprendersi uno spazio che speravamo finito, cercare altrove modelli politici può essere un esercizio interessante. L'ancora inesistente sulla carta – ma decisamente viva nella realtà – «nazione delle piante» rappresenta un esempio da seguire, soprattutto se abbiamo a cuore la sopravvivenza della nostra specie e del nostro pianeta, nonché della democrazia. Gli articoli della costituzione della nazione vegetale di questo suggestivo e interessante testo sono improntati alla cooperazione (o «mutuo appoggio», come scriveva lo scienziato anarchico Kropotkin), al rispetto dei limiti delle risorse disponibili, all'organizzazione decentralizzata e non burocratica, e includono anche il diritto alla migrazione perché «la nazione delle piante non ha confini».
Tutto questo ci sembra poco credibile, in un mondo da sempre considerato simbolo di immobilità e incapace di provare sensazioni. Ma basta pensare ai cambiamenti che la flora mette in atto di fronte ai mutamenti climatici: a ogni generazione le foreste di montagna si spostano lentamente più in alto, grazie alla collaborazione con altre specie, e di fronte all'esaurimento delle risorse riducono dimensioni e popolazioni (mentre la nostra società ha scelto la crescita infinita, un evidente nonsenso). C'è alla base il riconoscimento dell'importanza delle comunità di specie, in cui simbiosi e cooperazione modificano l'ambiente e rendono possibile la sopravvivenza anche di specie in apparenza lontane come la nostra: ma senza la produzione di ossigeno e carbonio dei vegetali, la vita animale sarebbe estinta.
Anche la capacità di rispondere ai cambiamenti è diversa tra animali e vegetali: le piante «sono costrette a risolvere i problemi, non potendo evitarli come gli animali». E l'organizzazione decentralizzata che usano (non puoi togliere il cervello a una pianta, né esiste un capobranco) è più resiliente di altre. Dunque, l'antropomorfizzazione operata nel volume non è dettata da una gerarchia antropocentrica quanto dalla necessità di individuare vie d'uscita dall'attuale crisi ambientale.

Mauro Capocci

La nazione delle piante
di Stefano Mancuso
Laterza, Roma-Bari, 2019,
pp. 144 (euro 12,00)

Un'icona globale del Rinascimento

Una mostra alle Scuderie del Quirinale di Roma celebra Leonardo da Vinci

Non ha ancora vent'anni quando entra nella bottega del Verrocchio che sta realizzando una sfera rivestita di rame dorato da collocare in cima alla lanterna del duomo di Firenze. La cosiddetta «palla del Verrocchio» cadrà per colpa di un fulmine nel 1601, ma l'esperienza tra le gru ideate quarant'anni prima da Filippo Brunelleschi deve essere stata di quelle che segnano un'esistenza, perché da allora Leonardo da Vinci non ha mai trascurato il proprio interesse per quell'incrocio, tipicamente umanista, tra ingegneria, architettura e lettere che lo ha portato a essere un'icona globale del Rinascimento.

Comincia da qui il percorso espositivo curato da Claudio Giorgione del Museo nazionale della scienza e della tecnologia «Leonardo da Vinci» di Milano ed ennesima tappa delle celebrazioni per i 500 anni dalla scomparsa dell'autore della *Gioconda* che interessano tutta l'Italia. La mostra ospitata alle Scuderie del Quirinale di Roma non ha solo l'obiettivo di esaltare i risultati del genio di Vinci, ma di incastonarlo all'interno della cultura dell'epoca, evidenziando la ragnatela di rapporti intellettuali e culturali che caratterizzavano l'Italia rinascimentale. Per questo i modelli delle macchine di Leonardo di proprietà del museo milanese sono esposti vicino ai fogli raramente visibili del *Codice Atlantico* provenienti dalla Biblioteca ambrosiana e a una serie di prestiti di valore assoluto: per esempio l'unico volume appartenuto con sicurezza a Leonardo, il *Trattato di architettura civile e militare* di Francesco di Giorgio, custodito alla Biblioteca laurenziana e ricco di annotazioni autografe. Dalla Bibliothèque di Ginevra, invece, proviene uno dei due volumi del *Divina Proportione* di Luca Pacioli, realizzato per Ludovico il Moro nel 1498 e corredato da 60 raffigurazioni di solidi basati sui disegni preparatori del maestro.

Opere del genio. In alto, un aliante costruito secondo un progetto di Leonardo; sopra un suo disegno sui mortai da guerra; sotto, un trattato sulla sua pittura.

TRATTATO
DELLA PITTVRA
DI LIONARDO
DA VINCI.
Nouamente dato in luce, con la vita dell'istesso autore, scritta
DA RAFAELLE DV FRESNE.
Si sono giunti i tre libri della pittura, & il trattato della statua di Leon Battista Alberti, con la vita del medesimo.

IN PARIGI,
Appresso GIACOMO LANGLOIS, stampatore ordinario del rè Christianissimo, al monte S. Genouefa, dirimpetto alla fontana, all'insegna della Regina di pace.
M. DC. LI.
CON PRIVILEGIO DEL RÈ.

Ma in mostra non ci sono solo manoscritti. A completare il racconto dei cinque temi principali del dibattito rinascimentale ci sono gli studi di Leonardo sulle eccellenze ingegneristiche lombarde (tessile e metallurgia); quelli su una Milano ideale a forma ottagonale; le macchine ora fantastiche, ora da guerra che Leonardo ha elaborato per tutta la vita; lo studio della prospettiva come metodo conoscitivo e rappresentativo del mondo. E molto altro, per un mito, quello del genio universale, che è arrivato fino ai giorni nostri e non conosce crisi.

Marco Boscolo

Prossimo numero

a luglio

Dossier: Ritorno alla Luna, cinquant'anni dopo

di A. Mann, S. Stewart, S. Lock, E. Jawin, E. Bell, C. Moskowitz

Mezzo secolo dopo la missione dell'Apollo 11, i progressi tecnologici hanno rivoluzionato quasi ogni aspetto della vita sulla Terra, eppure l'umanità non è più tornata sulla Luna. Il mutamento del quadro geopolitico ha reso più difficile ripetere l'impresa di Armstrong e compagni, ma gli Stati Uniti, la Cina e altri paesi, e alcune ambiziose aziende private, hanno fissato ufficialmente i loro obiettivi per un ritorno alla Luna a breve.

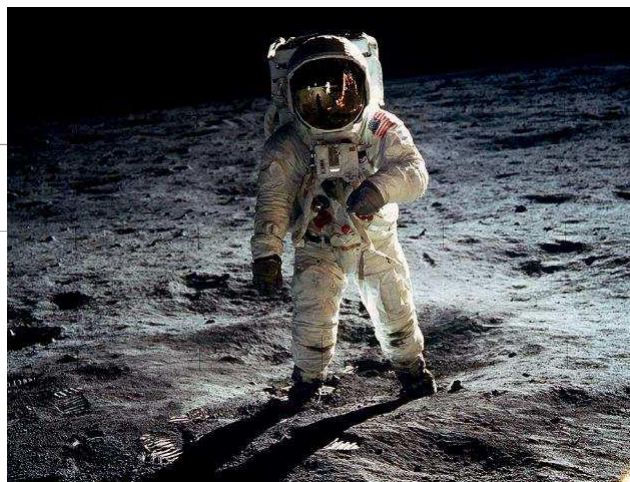
Sfida per la rigenerazione

di Kevin Strange e Viravuth Yin

Una molecola, studiata inizialmente per essere usata contro diabete e obesità, mostra la capacità di rigenerare gli organi danneggiati.

Il cordoglio dell'orca

di Barbara J. King

Nuove osservazioni sulla sofferenza degli animali per la morte di un compagno suggeriscono i motivi per cui alcune specie sperimentano il lutto e altre no.

LE SCIENZE S.p.A.

Sede legale: Via Cristoforo Colombo 90, 00147 ROMA.

Redazione: tel. 06 49823181
Via Cristoforo Colombo 90, 00147 Roma
e-mail: redazione@lescienze.it
www.lescienze.it

Direttore responsabile
Marco Cattaneo

Redazione
Claudia Di Giorgio (*caporedattore*), Giovanna Salvini (*caposervizio grafico*), Andrea Mattone (*grafico*), Cinzia Sgheri, Giovanni Spataro

Collaborazione redazionale
Folco Claudi, Gianbruno Guerrerio
Segreteria di redazione:
Andrea Lignani Marchesani
Progetto grafico: Giovanna Salvini

Referente per la pubblicità
A. Manzoni & C. S.p.A.
agente Daria Orsi (tel. 02 57494475, 345 4415852)
e-mail dorsi@manzoni.it

Pubblicità:
A. Manzoni & C. S.p.A.
Via Nervesa 21, 20139, Milano,
telefono: (02) 574941

Stampa
Puntoweb, Via Variante di Cancelliera, snc, 00040 Ariccia (RM).

Consiglio di amministrazione
Corrado Corradi (presidente), Michael Keith Florek (vice presidente), Gabriele Acquistapace, Markus Bossle, Stefano Mignanego

Responsabile del trattamento dati (D. lgs. 30 giugno 2003 n.196):
Marco Cattaneo

Registrazione del Tribunale di Milano n. 48/70 del 5 febbraio 1970.

Rivista mensile, pubblicata da Le Scienze S.p.A.
Printed in Italy - maggio 2019

ISSN 2499-0590

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in Chief and Senior Vice President
Mariette DiChristina

President
Dean Sanderson

Executive Vice President
Michael Florek

Hanno collaborato a questo numero
Per le traduzioni: Francesca Bernardis: *Perché crediamo alle teorie del complotto*; Silvio Ferraresi: *La macchina delle intenzioni, Il codice neurale dei volti*; Daniele Gewurz: *Gravità quantistica in laboratorio*; Lorenzo Lilli: *L'amplificatore del meteo*; Alfredo Tutino: *Gli altri animali che usano strumenti, Scosso dalle scosse*.

ABBONAMENTI E ARRETRATI
GEDI Distribuzione S.p.A.

Per informazioni sulla sottoscrizione di abbonamenti e sulla richiesta di arretrati telefonare al numero 0864.256266 o scrivere a abbonamenti@gedidistribuzione.it o arretrati@gedidistribuzione.it
Fax 02.26681986.

Italia	
abb. annuale	€ 39,00
abb. biennale	€ 75,00
abb. triennale	€ 99,00
copia arretrata	€ 9,00
Estero	
abb. annuale Europa	€ 52,00
abb annuale Resto del Mondo	€ 79,00

Accertamento diffusione stampa certificato n. 8593 del 18/12/2018

Franco Banfi/Getty Images (*orca*); World History Archive/AGF (*Buzz Aldrin*)